
**Entwicklung eines methodischen Ansatzes zur
langzeitsicheren Auslegung eines
Streckenverschlussbauwerks für ein Endlager für
wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle im Salz**

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
der Naturwissenschaften

vorgelegt von

Dipl.-Geol. Jana Orzechowski

aus Forst / Lausitz

genehmigt von der

Fakultät für Energie- und

Wirtschaftswissenschaften

der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung

09.08.2017

Dekanin:	Prof. Dr. rer. pol. habil. Ingeborg Wulf
Vorsitzender der Prüfungskommission:	Prof. Dr. rer. nat. habil. Hans-Jürgen Gursky
Hauptberichterstatter:	Prof. Dr. rer. nat. Klaus-Jürgen Röhlig
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. rer. nat. habil. Kurt Mengel

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftliche Mitarbeiterin im Fachgebiet Endlagersysteme des Institutes für Endlagerforschung der Technischen Universität Clausthal (2010-2013). Die Motivation zu der behandelten Thematik entwickelte sich aus meiner wissenschaftlichen Arbeit im Rahmen eines Kooperationsprojektes mit der DBE Tec (2009-2012) zum FuE-Vorhaben KOMTESSA hinsichtlich der Erarbeitung von Methoden zum Langzeitsicherheitsnachweis für Verschlussbauwerke im Salinar.

Mein Dank gilt all jenen, die mich bei der Arbeit an dieser Dissertation unterstützt haben, sei es unmittelbar durch Anregungen, Ratschläge und Kritik, sei es mittelbar durch die notwendige Abwechslung von der Arbeit. Einige Personen möchte ich an dieser Stelle besonders hervorheben.

Ich bedanke mich bei Prof. Dr. rer. nat. Klaus-Jürgen Röhlig für die Möglichkeit diese Doktorarbeit am Institut für Endlagerforschung im Fachgebiet Endlagersysteme anfertigen zu können, für die wissenschaftliche Begleitung dieser Arbeit, die konstruktiven Gespräche sowie die Unterstützung meiner Tätigkeit und die damit verbundene Gewährung von Freiräumen.

Mein Dank gilt auch Prof. Dr. rer. nat. habil. Kurt Mengel (Institut für Endlagerforschung – Fachgebiet Mineralogie, Geochemie, Salzlagerstätten) für die freundliche Bereitschaft zur Übernahme der Zweitbetreuung. Die fachlichen und außerfachlichen Gespräche wie auch seine Hilfsbereitschaft haben maßgeblich zur Realisierung dieser Arbeit beigetragen.

Ich danke Dr. Thomas Schirmer, Dr. Kai Schmidt (†) und Prof. Dr. rer. nat. habil. Kurt Mengel für Erlaubnis ihre unveröffentlichten Untersuchungsergebnisse über die Reaktionen von Sorelbeton im Kontakt mit unterschiedlichen salinaren Lösungen in dieser Arbeit verwenden zu können.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Karl-Heinz Lux und apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Düsterloh vom Lehrstuhl für Deponietechnik und Gebirgsmechanik der Technischen Universität Clausthal danke ich recht herzlich für die Bereitschaft zu fachlichen Gesprächen und die wertvollen Ratschläge und konstruktiven Anregungen.

Ein besonderer Dank geht an meinen ehemaligen Kollegen Dr. Elmar Plischke für die Durchsicht dieser Abhandlung, die kritischen Betrachtungen, die differenzierten Anmerkungen sowie die zahlreichen konstruktiven Diskussionen zu Fragestellungen jeglicher Fachrichtung.

Des Weiteren danke ich Dr. Karl Strauß und Dr. Claudia Swanson für die Durchsicht einzelner Kapitel und ihre konstruktiven Anmerkungen. Im ehemaligen Kollegenkreis danke ich Dr. habil. Elke Bozau, Dr. Karl Strauß, Dr. Claudia Swanson, Dr. Xiaoshou Li, Karin Tiedge, Ute Seute und Bianca Schwarz für die Schwätzchen, die Scherze, das Zuhören, das Aufmuntern sowie die vielen kleinen und größeren Unterstützungen.

An dieser Stelle möchte ich mich auch bei meinen Freunden Youldiz Tissaoui, Simone Koch und Christian Nolte bedanken, die mich emotional unterstützt haben und für die erforderliche Abwechslung sorgten. Ein herzlicher Dank geht außerdem an Vivien Petras, eine Freundin seit Kindertagen, für die motivierenden Worte und wertvollen Anregungen.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern Monika und Heinz Orzechowski, ihr neutraler Blick von außen und ihre unermüdliche liebevolle Unterstützung bei allen kleinen und großen Anliegen und Problemen haben mir den familiären Rückhalt zur Durchführung dieser Arbeit gegeben. Ohne Euch wäre ich nie soweit gekommen!

Kurzfassung

In den derzeitigen Planungen für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle wird mit dem Sicherheitskonzept ‚sicherer Einschluss‘ ein hohes Sicherheitsniveau angestrebt, dass kontinuierlich über den gesamten Nachweiszeitraum (1 Million Jahre) aufrecht erhalten werden soll. Mit Hilfe des Mehrbarrierenprinzips sollen einzelne verschiedene und in ihrer zeitlichen Wirksamkeit aufeinander abgestimmte Sicherheitsbarrieren (technisch, geotechnisch, geologisch) mit einer zeitlich parallel und teilweise überlappenden gesicherten Funktionsfähigkeit die Sicherheit des Endlagers gewährleisten.

In dieser Arbeit wird ein methodischer Ansatz zur langzeitsicheren Auslegung eines Streckenverschlussbauwerks für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle im Salz vorgestellt. Die normativen Ansätze des Bauwesens zielen auf einen Nachweis der Sicherheit von Bauwerken über maximal 100 Jahre ab. Zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit wird jedoch gegenwärtig eine Funktionalität untertägiger Verschlussbauwerke von mehreren 1.000 oder 10.000 Jahren gefordert. Der hier vorgestellte Ansatz zeigt eine Möglichkeit, die Anforderungen und Vorgehensweisen innerhalb der Langzeitsicherheitsbetrachtungen und des Ingenieurwesens miteinander zu verbinden, um so eine umsetzbare langzeitsichere Auslegung untertägiger geotechnischer Bauwerke zu ermöglichen. Durch ein schrittweises Vorgehen und mit Hilfe von Iterationskreisläufen wird sich einer optimalen Auslegung für ein untertägiges geotechnischen Bauwerk angenähert, das im Vergleich zum Bauwesen erheblich längere Nutzungszeiten hat und unter dem Aspekt der Nachsorgefreiheit die ihm angedachte Funktionsfähigkeit erbringen muss.

Das Konzept wird am Beispiel eines vereinfachten fiktiven Streckenverschlusses dargestellt. Es lässt sich feststellen, dass mit der vorgestellten methodischen Vorgehensweise eine langzeitsichere Auslegung eines Streckenverschlusses mit einer Lebensdauer von 1.000 Jahren möglich ist, wenn einige Veränderungen/Erweiterungen hinsichtlich der zu prüfenden Eigenschaften aus ausgesuchten Empfehlungen und Richtlinien umgesetzt werden.

Bei der Anwendung des erarbeiteten Konzeptes wird auch deutlich, dass noch weitreichende Ungewissheiten u.a. bezüglich der Abhängigkeiten und Ausprägungen von Einwirkungen und der Erkenntnisse über chemische, physikalische, thermische und mechanische Kombinationswirkungen bestehen. Diesbezüglicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf wird ausgewiesen.

Abstract

In the current plans for a HLW repository, the 'safe enclosure' safety concept aims at a high safety level that should be continuously maintained over the entire assessment period (1 million years). By means of the multiple barriers principle, individual safety barriers (technical, geotechnical, geological), which are adjusted to each other with respect to their effectiveness over time, have to ensure the safety of the repository by a parallel and partially overlapping functionality over time.

This thesis describes a methodical approach for designing a drift seal for a HLW-repository in salt with regard to long-term safety. The normative civil engineering approaches aim at providing the safety of buildings over a maximum period of 100 years. To provide long-term safety, currently a functionality of underground sealing structures over several 1,000 or 10,000 years is required. The presented approach provides a possibility to combine the requirements and procedures of long-term safety considerations with the ones coming from civil engineering to enable an implementable long-term reliable design of underground sealing structures. By a stepwise procedure and by iteration circuits, an optimal design for an underground geotechnical sealing structure is approached – which, in comparison to the civil engineering requirements, must provide the intended functionality for considerably longer periods of use and account for passive safety.

The concept is described by using the example of a simplified drift seal. It can be shown that the presented methodological approach allows a long-term reliable design of a drift seal with a life-time of 1,000 years, if some changes/extensions are implemented concerning the properties addressed by selected recommendations and guidelines.

When applying the developed concept, it also becomes clear that there are still substantial uncertainties, i.a. concerning the dependencies and characterization of impacts and the knowledge of combined chemical, physical, thermal and mechanical combination effects. Related research and development needs are reported.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	i
Kurzfassung	iii
Abstract	v
Abbildungsverzeichnis	ix
Tabellenverzeichnis	xi
Abkürzungsverzeichnis	xii
1 Einleitung	1
2 Begriffsdefinitionen und -erläuterungen	5
3 Prinzipien und Grundsätze zur Langzeitsicherheit von geologischen Tiefenlagern	12
3.1 Internationale Prinzipien und Grundsätze	12
3.2 Nationale Prinzipien und Grundsätze	15
3.3 Die Stellung des Streckenverschlussbauwerks innerhalb des Mehrbarrierensystems	17
4 Streckenverschlussbauwerke – historische Entwicklung und auslegungsbestimmende Vorgaben	19
4.1 Design, Konstruktionsbeispiele und Konzepte	19
4.1.1 Streckenverschlussbauwerke im Salzbergbau	21
4.1.2 Konzepte für Streckenverschlussbauwerke in Endlagern für radioaktive Abfälle in Salzgesteinen	26
4.2 Anforderungen aus Gesetzestexten, Richtlinien und Empfehlungen	32
4.2.1 Gesetze und Verordnungen	32
4.2.2 Richtlinien und Empfehlungen	34
4.2.3 Sinngemäße Anwendung normativer und regulatorischer Regelwerke	41
5 Rahmenkonzept für Bemessung und Nachweisführung	47
6 Festlegung der Sicherheitsfunktionen, der Lebensdauer und der Funktionsindikatoren	55
7 Identifikation von Kriterien der Langzeitsicherheit	60
7.1 Identifizierung der FEP hinsichtlich der Auslegung eines Verschlussbauwerks	61
7.2 Kategorisierung der ausgewählten FEP	66
7.3 Betrachtung der FEP hinsichtlich ihres zeitlichen Auftretens	74
7.4 Kombination und Interaktionen von FEP-Einwirkungen	84
8 Einbindung langfristig relevanter FEP in einen ingenieurtechnischen Ansatz	87
8.1 Abgleich der Kriterien zur Langzeitsicherheit mit den zu prüfenden Eigenschaften der GDA-Empfehlung	88

8.2	Sicherheitsnachweis mit Hilfe von Kriterien und Indikatoren	93
8.2.1	Kriterien zum Nachweis der Tragfähigkeit und Integrität	94
8.2.2	Indikatoren und beeinflussende FEP	95
8.3	Langzeitliche Einwirkungen und Auswirkungen auf einen Streckenverschluss	99
8.3.1	Einfluss der Temperatur aus dem radioaktiven Zerfall des Abfalls	99
8.3.2	Änderung des chemischen Milieus	101
8.4	Vorschlag einer erweiterten Vorgehensweise bei der Vorbemessung eines geotechnischen Streckenverschlussbauwerks	103
9	Aspekte der Vorbemessung am Beispiel eines Streckenverschlusses	107
9.1	Vorbemessungsaspekt: Temperaturentwicklung am Streckenschlussbauwerk	108
9.2	Vorbemessungsaspekt: Veränderung des geochemischen Milieus und Alteration des Bauwerks	113
10	Weitere Aspekte im Zusammenhang mit der Auslegung und Nachweisführung von Streckenverschlussbauwerken	123
11	Zusammenfassende Darstellung des konzeptionellen Ablaufs und Zuordnung wesentlicher Schlussfolgerungen	134
12	Zusammenfassung und Ausblick	145
	Literatur	149
	Anhang	163
	Anhang A: IAEA safety fundamental and requirement	163
	Anhang B: Teilsicherheitsbeiwerte des Eurocode, der KTA und der DAfStb	168
	Anhang C: Definitionen von Begriffen aus den verwendeten unterschiedlichen Normen	173
	Anhang D: Auswahl- und Ausschlussgründe für die verwendeten FEP	176

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Grundformen von Dammbauwerken (nach LANGER 1995 / 1996)	19
Abb. 2: Längsschnitt des Dammbauwerkes im Bergwerk Leopoldshall (nach N.N. 1902)	22
Abb. 3: Längsschnitt des Dammbauwerkes im Bergwerk Sachsen-Weimar (nach LOHMANN 1930)	22
Abb. 4: Längsschnitt (A) und Draufsicht (B) des Dammbauwerks im Bergwerk Hope (nach FISCHLE & SCHWIEGER 1987)	23
Abb. 5: Dammbauwerk im Bergwerk Ludwigshall/Immenrode–Schacht Immenrode (nach ALAND ET AL. 1999)	24
Abb. 6: Längsschnitt des Dammbauwerks im Bergwerk Sondershausen (nach SITZ 2003)	24
Abb. 7: Entwurf eines Streckenverschlusses für das Bergwerk Teutschenthal (nach KNOLL 2005)	25
Abb. 8: Konzept eines beidseitig wirkenden Streckenverschlusses für ein Endlager (nach FISCHER 1990)	26
Abb. 9: Längsschnitt des geplanten und teilweise erbauten Versuchsdamms Asse II (nach FISCHER 1990 / MÜLLER-HOEPPE 2010)	27
Abb. 10: Streckenverschlussbauwerke für das Endlager Morsleben (nach KRAUKE & FLIß 2008 / nach POLSTER 2010)	30
Abb. 11: Längsschnitt eines horizontalen Verschlussbauwerks des Einlagerungsbereiches für die WIPP (nach DOE 2004 / CAMPHOUSE 2012)	31
Abb. 12: Konstruktive Gestaltung eines Streckenverschlussbauwerks für ein mögliches HLW-Endlager Gorleben, Längsschnitt (nach MÜLLER-HOEPPE ET AL 2012)	32
Abb. 13: Konzept für die Bemessung und Nachweisführung eines geotechnischen Verschlussbauwerks	48
Abb. 14: Integration der ausgewählten FEP in die ingenieurtechnische Auslegung eines geotechnischen Verschlussbauwerks	51
Abb. 15: Darstellung der Sicherheitsfunktionen (rot) und deren jeweiligen Funktionsindikatoren (blau) für eine geotechnische Barriere unter Berücksichtigung des Sicherheits- konzeptes „Sicherer Einschluss“	59
Abb. 16: Darstellung der Abhängigkeiten zwischen den identifizierten FEP auf ein Verschluss- bauwerk (modifiziert nach BUHMANN ET AL. 2010A)	67
Abb. 17: Kategorien der festgelegten FEP-Einwirkungen	70
Abb. 18: Darstellung der FEP-Einwirkungen für einen Streckenverschluss mit einer Lebens- dauer von 1.000 Jahren in die Kategorisierungsgruppen nach Abhängigkeiten	70
Abb. 19: Übergeordnete Einwirkungen durch die Zusammenfassung der FEP-Einwirkungen auf einen Streckenverschluss mit einer Lebensdauer von 1.000 Jahren und deren Abhängigkeiten	71
Abb. 20: Qualitative Darstellung der Wärmeentwicklungsverläufe im Einlagerungsbereich und am Streckenverschlussbauwerk (StrV) (basierend auf DELISLE 1980 / ENGELMANN ET AL. 1993 / BOLLINGERFEHR ET AL. 2012)	77

Abb. 21: Temperaturphasen, in denen Temperaturveränderungen die FEP-Einwirkungen auf ein geotechnisches Verschlussbauwerk unterschiedlich beeinflussen	78
Abb. 22: Darstellung des ungefähren zeitlichen Verlaufes der übergeordneten FEP-Einwirkungen auf einen Streckenverschluss mit einer Lebensdauer von 1.000 Jahren bezüglich Auftreten, Ungewissheit, Ausprägung und Sicherheitsrelevanz	83
Abb. 23: Schematische Darstellung der Auswirkungen von den FEP „Marine Bedingungen“ (links) und „Vollständige Inlandvereisung“ (rechts) auf die Erosion, die Auflast und die Spannungsänderungen	85
Abb. 24: Interaktionen der FEP-Einwirkungen auf ein Streckenverschlussbauwerk mit einer Lebensdauer von 1.000 Jahren	86
Abb. 25: Schematische Darstellung eines Systems aus Streckenverschlussbauwerk und umgebendem Salzgebirge mit den aufgelockerten Bereichen (Auflockerungszone, Übergangszone) (in Anlehnung an XIE 2003)	88
Abb. 26: Zuordnung der FEP-Einwirkungen zu den Anforderung an die zu prüfenden Eigenschaften der Tragfähigkeit für ein Streckenverschlussbauwerk mit einer Lebensdauer von 1.000 Jahren	90
Abb. 27: Zuordnung der FEP-Einwirkungen zu den Anforderung an die zu prüfenden Eigenschaften der Beständigkeit für ein Streckenverschlussbauwerk mit einer Lebensdauer von 1.000 Jahren	91
Abb. 28: Zuordnung der FEP-Einwirkungen zu den Anforderung an die zu prüfenden Eigenschaften der Dichtigkeit für ein Streckenverschlussbauwerk mit einer Lebensdauer von 1.000 Jahren	93
Abb. 29: Kriterien zum Nachweis der Tragfähigkeit (schwarz) und der Barriereintegrität (rot) für ein geotechnisches Verschlussbauwerk und dessen unmittelbar umgebenden Gebirges (nach XIE 2002 / DÜSTERLOH 2013)	95
Abb. 30: Übersicht über die Indikatoren der Tragfähigkeit und der Barriereintegrität, deren Anforderungswerte und die jeweiligen beeinflussenden FEP für ein Streckenverschlusssystem mit einer Lebensdauer von 1.000 Jahren	96
Abb. 31: Aufbau des Endlagers als Grundlage des Berechnungsmodells (nach BOLLINGERFEHR ET AL. 2012)	108
Abb. 32: Zeitlicher Temperaturverlauf bei einer Streckenlagerung an den Streckenverschlussbauwerken im Berechnungsmodell Endlagerauslegung (Bollingerfehr et al. 2012)	110
Abb. 33: Zeitlicher Temperaturverlauf bei einer Bohrlochlagerung an den Streckenverschlussbauwerken im Berechnungsmodell Endlagerauslegung (BOLLINGERFEHR ET AL. 2012)	111
Abb. 34: Berechnete Entwicklung der Reaktionen von ausgehärteten Sorelbeton mit dominierender 3-1-8 Phase (A) und reine NaCl-Lösung (B) (SCHIRMER ET AL 2013)	119
Abb. 35: Berechnete Entwicklung der Reaktionen von ausgehärteten Sorelbeton mit dominierender 3-1-8 Phase (A) und einer NaCl-Lösung mit Mg ²⁺ Anteil (B) (SCHIRMER ET AL. 2013)	120

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Beispiele von Anforderungen innerhalb eines geotechnischen Sicherheitsnachweises für Bauwerkskonstruktionen aus den Richtlinien und Empfehlungen	43
Tab. 2: Übersicht über die Auswahl von FEP für die Szenarien bezüglich der Langzeitsicherheit (LZS) und der Vorbemessung (VB) für die Auslegung einer geotechnischen Barriere	63
Tab. 3: Kategorisierungsansatz hinsichtlich einer Bemessungssituation.	73
Tab. 4: Überblick über das zeitliche Auftreten der ausgewählten FEP-Einwirkungen an einem Streckenverschlussbauwerk	81
Tab. 5: Vergleich der zeitbezogenen Temperaturentwicklungen am Streckenverschlussbauwerk Ost für die Strecken- und Bohrlochlagerung im Berechnungsmodell Endlagerauslegung (Daten aus BOLLINGERFEHR ET AL. (2012))	111
Tab. 6: Näherungswerte der Zeitpunkte und der Temperatur am Streckenverschluss Ost	113

Tabellen im Anhang

Tab. B - 1: Darstellung von Teilsicherheitsbeiwerten (TSBW) für Einwirkung / Beanspruchung, Widerstand und geotechnische Kenngrößen (basierend auf Anhang A DIN EN 1997-1 2009 (schwarz), NDS.MBI 2012 (blau), HANDBUCH EUROCODE 7 2011(grün))	168
Tab. B- 2: Anhaltswerte für Teilsicherheitsbeiwerte (KTA 2502 / KTA-GS-78)	171
Tab. B- 3: Teilsicherheitsbeiwerte zur Bestimmung des Tragwiderstandes von Bauteilen aus Beton im Grenzzustand der Tragfähigkeit für die Anforderungskategorien A1 bis A3 (KTA 2502 / KTA-GS-78)	172
Tab. B- 4: Sicherheitsbeiwerte aus der DAfStb (2011)	172
Tab. C- 1: Überblick über die Definitionen und die Anforderungen für die Nachweise der Dichtigkeit, Tragfähigkeit, Beständigkeit, Herstellbarkeit, Dauerhaftigkeit, Zuverlässigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Sicherheit aus einigen Empfehlungen und Richtlinien	173
Tab. D - 1: Gründe zur Auswahl von FEP für die Auslegungsszenarien	176
Tab. D - 2: Übersicht über die verwendeten FEP für die Vorbemessung unter Berücksichtigung der Lebensdauer des Verschlussbauwerks	182
Tab. D - 3: Gründe für die Änderung von Abhängigkeiten von FEP in Bezug auf BUHMANN ET AL. (2010A)	185

Abkürzungen

ABerg	Allgemeine Bundesbergverordnung
Akend	Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte
Art	Artikel
AtG	Atomgesetz
AtStrISV	Verordnung über die Gewährleistung von Atomsicherheit und Strahlenschutz
AtVfV	Atomrechtliche Verfahrensordnung
BBerg	Bundesberggesetz
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BUmwS	Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (entspr. DAfStb-Richtlinie)
BVerfGE	Bundesverfassungsgericht
DepV	Deponieverordnung
DAfStb	Deutscher Ausschuss für Stahlbeton
Euratom	Europäische Atomgemeinschaft
ewG	einschlusswirksamer Gebirgsbereich
FEP	Features, Events and Processes (Merkmale, Ereignisse und Prozesse)
FI	Funktionsindikator
GG	Grundgesetz
GDA	Geotechnik der Deponien und Altlasten
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH
HLW	High Level Waste („hochradioaktive Abfälle“ – wärmeentwickelnd)
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICRP	International Commission on Radiological Protection
ILW	Intermediate Level Waste („mittelradioaktive Abfälle“ – vernachlässigbare Wärmeentwicklung)
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
KTA	Kerntechnischer Ausschuss
LLW	Low Level Waste (schwachradioaktive Abfälle – vernachlässigbare Wärmeentwicklung)
LZN	Langzeitsicherheitsnachweis
NBauO	Niedersächsische Bauordnung
NEA	Nuclear Energy Agency

OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
PTKA	Projektträger Karlsruhe
SF	Sicherheitsfunktion
SSG	Specific Safety Guide
SSR	Specific Safety Requirement
StrlSchV	Strahlenschutzverordnung
TA-Abfall	Technische Anleitung - Abfall
UVPG	Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung
UVP-V Bergbau	Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung bergbaulicher Vorhaben
VersatzV	Versatzverordnung
VSG	Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben
WHG	Wasserhaushaltsgesetz

1 Einleitung

Die Frage nach dem Umgang mit radioaktiven und chemotoxischen Abfällen stellt eines der meistdiskutierten umweltpolitischen Probleme dar. Es herrscht ein allgemeiner Konsens darüber, dass die Entsorgung der hochradioaktiven Abfälle mit der Verbringung nach unter Tage und die Einlagerung in tiefen geologischen Formationen die sicherste Möglichkeit darstellt, Abfälle mit hohem gesundheitsgefährdenden Potential dauerhaft einzuschließen. Auch Deutschland favorisiert das Entsorgungskonzept der Isolation der Abfälle von der Biosphäre durch deren Konzentration in tiefen geologischen Formationen, um das oberste Schutzziel – den Schutz des Menschen und der Umwelt vor dem Kontakt mit Radionukliden – zu gewährleisten und langfristig sicherzustellen.

In Deutschland intensiv untersuchte und potentiell für die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle geeignete Wirtsgesteine sind die Salzgesteine des Zechsteins (Einlagerungsbereich im Hauptsalz der Staßfurt-Serie). Obwohl diese ein hohes Lösungsverhalten gegenüber ungesättigten wässrigen Lösungen besitzen, bietet das Medium Salz viele Vorteile (z.B. hohe Temperaturverträglichkeit, annähernde Undurchlässigkeit) und könnte durch sein plastisch-viskoses Verhalten als derzeitige einzige im Endlagerbereich vorgeschlagene Gesteinsart einen vollständigen Einschluss hochradioaktiver Abfälle gewährleisten. Diese Aussage beruht auf der Annahme, dass die durch eine Temperaturerhöhung verstärkte Konvergenz des Salzgebirges zum Einschluss der eingelagerten Abfälle führt und die bergmännisch geschaffenen und bei der Stilllegung mit Salzgrus versetzten Hohlräume soweit verschließt, dass sich die Permeabilität wieder den ursprünglich vorhandenen Werten von unbeschädigtem Steinsalz annähert. Da die Konvergenz des Salzgebirges allerdings ein langfristig kontinuierlich verlaufender Prozess ist, müssen vorangehende Maßnahmen getroffen werden, die eine Freisetzung von Radionukliden in die Biosphäre unterbinden und den Einlagerungsbereich gegen einen möglichen Zutritt von wässrigen Lösungen durch die offenen Gruben Hohlräume absichern.

Das Sicherheitskonzept für ein HLW-Endlager in Salzformationen stützt sich dabei auf das Mehrbarrierenkonzept. Die partiell redundanten und funktional relativ unabhängigen einzelnen Barrieren (technisch, geotechnisch und geologisch) greifen ineinander über und sollen durch eine zeitlich abhängige Wirksamkeit ein gleichbleibendes Sicherheitsniveau über einen Zeitraum von einer Million Jahren gewährleisten. Die Barrierewirksamkeit basiert auf verschiedenen physikalischen und chemischen Mechanismen und sollte selbst bei unerwarteten Einschränkungen der Funktion einer Barriere durch die anderen Barrieren kompensiert werden, um eine unzulässige radiologische Auswirkung auf die Biosphäre auszuschließen. Während die technische Barriere (Einlagerungsbehälter) vorwiegend in der Betriebsphase für den sicheren Transport sowie hinsichtlich der Anforderungen zur Rückholbarkeit und Bergbarkeit relevant ist und die geologische Barriere (einschließlich eines ausreichenden einschlusswirksamen Gebirgsbereich um das Einlagerungsareal) die Langzeitsicherheit gewährleistet soll, sind die geotechnischen Barrieren besonders in der frühen Nachbetriebsphase von großer Bedeutung. Sie haben die Aufgabe, die aus der Endlagerauffahrung bedingten Wegsamkeiten in der geologischen Barriere zu verschließen und sind damit in diesen Bereichen für die Einhaltung der Schutzziele des Gesamtsystems maßgebend. Sie müssen daher ab dem Zeitpunkt ihres Einbaus bis zum Zeitpunkt einer nachweislich ausreichenden Wirksamkeit der Salzgruskompektion ihre Funktionalität hinsichtlich Dichtigkeit und Tragfähigkeit aufrechterhalten können. Die zwei wichtigsten einzusetzenden geotechnischen Barrieren sind der Schacht- und der Streckenverschluss. Während bei Deponien und Abbaubergwerken der Schachtverschluss als Abdichtungsbauwerk hervorgehoben wird und der Streckenverschluss eher eine untergeordnete Rolle spielt, kann dem Streckenverschluss in einem Endlager für radioaktive Stoffe z.B. als Sicherheitselement am Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereich eine wesentliche Bedeutung zu kommen. An dieser Position muss der

Streckenverschluss die anthropogen geschaffene mögliche Wegsamkeit für eindringende Lösungen zum eingelagerten Inventar verschließen und damit den durch die Errichtung des Endlagers hervorgerufenen Sicherheitsverlust des einschlusswirksamen Gebirgsbereich kompensieren.

Die Auslegung eines solchen Bauwerks erfordert eine verlässliche und gut dokumentierte Nachweisführung, die mit ihrer Sicherheitsaussage weit in die Nachbetriebsphase hineinreicht und während dieser Zeit auch kritische Situationen, wie z.B. einen Lösungszutritt, einschließt. Die Nachweisverfahren aus den aktuellen bautechnische Empfehlungen und Richtlinien beziehen sich nur auf übertägige Bauwerke mit einer Lebensdauer von ca. 100 Jahren und der Möglichkeit zur Instandsetzung, jedoch nicht auf untertägige Bauwerke mit einer notwendigen nachsorgefreien Lebensdauer von mehreren 1.000 Jahren.

In der durchgeführten vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) für ein mögliches Endlagers im Salinar wurden Methoden sowohl für die ingenieurtechnische Nachweisführung als auch für einen Langzeitsicherheitsnachweis entwickelt. Die Arbeiten konzentrieren sich allerdings vorwiegend auf eine Einzelbetrachtung beider Gebiete. Dennoch zeigen die ausführlichen mechanischen und hydraulischen Untersuchungen eine ingenieurtechnische Vorgehensweise zum Nachweis der Wirksamkeit untertägiger Bauwerke. Um die hohen technischen und sicherheitsrelevanten Anforderungen über die gesamte geforderte Lebensdauer hinweg erfüllen zu können, besteht jedoch die Notwendigkeit einer eingehenden Betrachtung der für die Langzeitsicherheit relevanten Aspekte und deren Integration in die Bemessung und Auslegung und somit in die ingenieurtechnische Nachweisführung der geotechnischen Barrieren. Eine derartige Verbindung würde neben einer langzeitsicheren Bauwerksauslegung auch eine effektivere Vorgehensweise gegenüber der Einzelbetrachtung der Bemessung und des Langzeitsicherheitsnachweises darstellen. Die hierfür erforderlichen methodischen Ansätze erfordern Grundlagenuntersuchungen, insbesondere zum Einfluss langfristig auftretender Einwirkungen und der Abschätzung ihrer Folgen zur Gewährleistung der an die Abdichtung gestellten Anforderungen.

Die vorliegende Arbeit zeigt eine Möglichkeit, die Anforderungen und Vorgehensweisen des Langzeitsicherheitsnachweises und des Ingenieurwesens miteinander zu verbinden, um eine umsetzbare langzeitsichere Auslegung untertägiger geotechnischer Bauwerke zu ermöglichen. Es wird eine methodische Vorgehensweise vorgestellt und am Beispiel eines fiktiven Streckenverschlusses erläutert. Im Vordergrund der Arbeit steht die auf eine Langzeitsicherheitsanalyse gestützte Betrachtung langzeitlicher Einwirkungen. Dabei wird u.a. den Fragen nachgegangen, welche langzeitlichen Einwirkungen die Sicherheitsfunktion des Streckenverschlusses beeinträchtigen können und ob derzeitige ingenieurtechnische Regelwerke und ihre Grundlagen im Hinblick auf erheblich längere Nutzungszeiten übernommen werden können bzw. welcher Änderungs- und Ergänzungsbedarf besteht. Zusätzlich wird anhand der entwickelten Vorgehensweise und der Datenbasis aus den Betrachtungen der VSG die Durchführung einer Vorbemessung eines Streckenverschlusses nach der hier vorgestellten Vorgehensweise geprüft. Von einer Zusammenfassung aller Bemessungsergebnisse aus der VSG wird allerdings abgesehen, da in dieser Arbeit vorrangig die Methodik dargestellt werden soll. Weiterhin wird eine mögliche Anwendung der Vorgehensweise des Eurocodes angesprochen. Langzeitlich auftretende Einwirkungen werden hinsichtlich ihrer Bemessungssituation und Sicherheitsrelevanz eingeordnet und die grundsätzliche Anwendbarkeit des Eurocodes auf untertägige nachsorgefreie Verschlussbauwerke diskutiert.

Da sich die Betrachtungen in dieser Arbeit auf die Nachverschlussphase und die Langzeitsicherheit beschränken, wird die Qualifikation des Personals, die Qualitätssicherung der Werkstoffe und die fachgerechte Umsetzung bei der Fertigung und Errichtung des Streckenverschlusses während der Betriebsphase als gegeben vorausgesetzt.

Das erarbeitete Rahmenkonzept basiert auf den Anforderungen aus der Langzeitsicherheit und den regulatorischen und normativen Vorgaben des Ingenieurwesens. Die Trennung von bereits bestehenden Vorgaben und der neu entwickelten Vorgehensweise spiegelt sich im Aufbau der Arbeit wider. Nach der Beschreibung ausschlaggebender Grundsätze der Langzeitsicherheit sowie gesetzlicher und normativer Vorgaben und der darauf basierenden Ableitung von Anforderungen an ein Streckenverschlussbauwerk erfolgt die Vorstellung des Rahmenkonzeptes und die Erläuterung der grundsätzlichen Vorgehensweise am Beispiel eines Streckenverschlussbauwerks.

Die einzelnen Kapitel behandeln:

In **Kapitel 2** werden Begriffe und Definitionen aufgeführt und erläutert.

Kapitel 3 zeigt die aktuellen internationalen und nationalen Prinzipien und Grundsätze zur Langzeitsicherheit von geologischen Tiefenlagern auf. Neben der Vorstellung der wichtigsten Institutionen wird darauf eingegangen, auf welchen Grundsätzen die nationalen sicherheitstechnischen Kriterien der Langzeitsicherheit basieren. Diese Grundsätze bilden die Basis entsprechender gesetzlichen Regelungen der Sicherheitsbelange im Zusammenhang mit dem Bau eines Endlagers (Kapitel 4). Das Kapitel dient ferner dazu, die Bedeutung von geotechnischen Verschlussbauwerken zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit eines Endlagers für radioaktive Abfälle im Salinar zu skizzieren.

Das **Kapitel 4** gibt einerseits einen Überblick über die bereits umgesetzten und geplanten Streckenverschlussbauwerke, andererseits bietet es einen Abriss über die derzeit bindenden und empfohlenen nationalen Vorgaben für Streckenverschlussbauwerke in einem Endlager für hochradioaktive Abfälle. Im Vordergrund stehen dabei die Betrachtung, Ausarbeitung und Zusammenfassung spezieller normativer und regulatorischer Anforderungen, die als auslegungsbestimmende Vorgaben bei Streckenverschlussbauwerken für ein Endlager herangezogen werden können. Die daraus ermittelten Ergebnisse bilden eine Grundlage des in dieser Arbeit dargestellten Rahmenkonzeptes.

Kapitel 5 stellt das Rahmenkonzept für die Bemessung und Nachweisführung eines geotechnischen Verschlussbauwerks vor. Es zeigt eine Möglichkeit, wie die Anforderungen aus dem Sicherheitskonzept der Langzeitsicherheit mit den zu prüfenden Eigenschaften für Abdichtungsbauwerke aus den gesetzlichen und normativen Regelwerken zusammengeführt werden können, um eine langzeitsichere ingenieurtechnische Bauwerksauslegung zu gewährleisten.

Kapitel 6 stellt die Sicherheitsfunktionen und Funktionsindikatoren eines Streckenverschlussbauwerks vor und legt damit die notwendigen Eigenschaften und die grundlegenden zu überprüfenden Anforderungen fest. Außerdem wird auf die Festlegung der Lebensdauer eines Verschlussbauwerks eingegangen. Die Festlegung von Sicherheitsfunktionen, Funktionsindikatoren und der Lebensdauer sind ausschlaggebend für die Identifizierung und spätere Einbeziehung möglicher eintretender FEP hinsichtlich der Langzeitsicherheitsbetrachtung und stellt eine Grundlage für die in Kapitel 7 durchgeführten Betrachtungen dar.

Kapitel 7 beschäftigt sich mit der Identifizierung von Kriterien der Langzeitsicherheit. Bezogen auf die zuvor festgelegten Sicherheitsfunktionen und Funktionsindikatoren werden langzeitliche Einwirkungen spezifiziert, die mit ihren Auswirkungen innerhalb einer festgelegten Lebensdauer bei einem Streckenverschlussbauwerk ausschlaggebend sind. Die Festlegung dieser Einwirkungen bildet die Grundlage für einen Abgleich mit den derzeitigen ingenieurtechnischen Auslegungskriterien.

In **Kapitel 8** werden die Anforderungen der Langzeitsicherheit mit den Vorgaben an die ingenieurtechnische Bauwerksauslegung abgeglichen. Zuerst wird auf die ingenieurtechnischen Prüfkriterien an ein geotechnisches Verschlussbauwerk in einem Endlager für radioaktive Abfälle eingegangen und die Beeinflussung langzeitlicher Einwirkungen dargestellt. Danach erfolgt eine Zuordnung und ein Abgleich der in Kapitel 7 spezifizierten langzeitrelevanten Einwirkungen mit den zu prüfenden Eigenschaften für Abdichtungsbauwerke. Dabei werden die für eine Langzeitsicherheit zusätzlichen Anforderungen und Nachweiskriterien abgeleitet und in die Prüfkriterien eingebunden. Die Ergebnisse der durchgeführten Betrachtungen führen zu einem Vorschlag einer Vorgehensweise für eine Vorbemessung eines geotechnischen Streckenverschlussbauwerks.

Kapitel 9 zeigt einen auf den Arbeitsergebnissen basierenden Ansatz für eine Vorbemessung mit Hilfe der in der VSG ermittelten Datenbasis am Beispiel des für Gorleben geplanten Streckenverschlusses. Das Kapitel gibt Aufschluss über den Bestand notwendiger Daten und verdeutlicht die Vorgehensweise zur Durchführung einer Vorbemessung durch die Betrachtung von Vorbemessungsaspekten. Hier wird auch auf die chemische Stabilität des geplanten Bauwerkmaterials eingegangen.

In **Kapitel 10** werden vier ausgewählte Aspekte angesprochen und im Zusammenhang mit einer langzeitsicheren Auslegung eines Streckenverschlussbauwerks gedanklich weitergeführt: der thermische Einfluss aus den eingelagerten Abfällen auf das Wirtsgestein, die in der VSG diskutierte Nachweismethode der geochemischen Langzeitstabilität, die Anwendung der Nachweismethodik des Eurocodes und der Einbezug von Rückhaltungsaspekten. Diese beispielhafte Diskussion zeigt, dass neben der Spezifizierung von Einwirkungen weitreichende grundsätzliche Überlegungen notwendig sind, um die angestrebte Langzeitsicherheit eines Verschlussbauwerks zu gewährleisten und nachzuweisen.

In **Kapitel 11** erfolgen eine zusammenfassende Darstellung des konzeptionellen Ablaufs und die Zuordnung wesentlicher Schlussfolgerungen für das Beispiel eines fiktiven Streckenverschlusses mit der Zielsetzung einer Vorbemessung zur Gewährleistung einer Lebensdauer von 1.000 Jahren. Dabei wird der damit im Zusammenhang stehende abgeleitete Forschungs- und Entwicklungsbedarf angesprochen.

Abschließend erfolgt in **Kapitel 12** eine Zusammenfassung.

Es wurden Publikationen, Daten, Empfehlungen und Gesetzestexte mit Stand einschließlich Mai 2014 berücksichtigt.

2 Begriffsdefinitionen und -erläuterungen

Zwischen den Bereichen des Ingenieurwesens und der Langzeitsicherheitsanalyse zeigen sich teilweise deutlich sprachliche Divergenzen. Zum besseren Verständnis der Ausführungen der vorliegenden Arbeit werden wichtige Begrifflichkeiten im Folgenden erläutert.

Alteration

„Die Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen beschreibt die Anpassung von mineralischen [und organischen] Materialien an veränderte (geo)chemische Umgebungsbedingungen über die Zeit“ (BUHMANN ET AL. 2010A, S. 253). Sie umfasst Auflösungs- und Ausfällungsprozesse.

Alternativszenarium

„Alternativszenarien beschreiben weniger wahrscheinliche oder im Referenzszenarium nicht erfasste wahrscheinliche, mögliche Entwicklungen des Endlagersystems. Solche Entwicklungsmöglichkeiten können aus dem Auftreten eines weniger wahrscheinlichen FEP, der weniger wahrscheinlichen Ausprägung eines wahrscheinlichen FEP oder aus Alternativen zu den spezifischen Annahmen für das Referenzszenarium resultieren“ (BEUTH ET AL. 2012, S. 5)

Auslegung

Unter dem Begriff Auslegung wird in dieser Arbeit der gesamte Prozess der Tragwerksplanung verstanden. Dies umfasst die Teilprozessschritte der geometrischen Abmessung, die Materialauswahl, die Ermittlung der Gebirgsparameter, der nachzuweisenden Zustandsgrößen und der Einwirkungen sowie die Durchführung des ingenieurtechnischen Sicherheitsnachweises anhand von Bemessungsergebnissen unter Einbezug des ingenieurtechnischen Sicherheitskonzeptes.

Auslegungsszenarium

Das Auslegungsszenarium beschreibt die potentielle Entwicklung eines geotechnischen Verschlussbauwerks die der Auslegung zugrunde gelegt wird. Es beruht auf bauwerksspezifischen FEP. Bauwerksspezifische FEP sind alle Merkmale, Ereignisse und Prozesse, die hinsichtlich ihrer Ausprägung, Interaktion und ihres Zeitverlaufs innerhalb des Zeitrahmens eines Langzeitsicherheitsnachweises mit einem Verschlussbauwerk im Zusammenhang stehen bzw. in Verbindung gebracht werden können.

Ausprägung

Die Ausprägung sagt aus, in welcher Intensität, in welchem räumlichen Ausmaß oder in welcher Zeitspanne ein FEP auftritt.

Auswirkung

Auswirkungen von Einwirkungen sind „Beanspruchungen von Bauteilen (z.B. [...] Spannungen, Dehnungen) oder Reaktionen des Gesamtbaustragwerks (z.B. Durchbiegungen, Verdrehungen) die durch Einwirkungen hervorgerufen werden“ (DIN EN 1990 2010, S. 15) sowie physikalische Veränderungen von Lösungen und Feststoffen.

Bedingte Wahrscheinlichkeit

Unter einer bedingten Wahrscheinlichkeit ist eine „Wahrscheinlichkeit zu verstehen, mit der ein FEP unter der Bedingung auftritt, dass die für sein Eintreten notwendigen Voraussetzungen am Referenzstandort vorliegen bzw. mit Sicherheit zu erwarten sind. Die bedingte Eintritts-

wahrscheinlichkeit eines FEP wird zur Ableitung und Klassifizierung der Eintrittswahrscheinlichkeit der Szenarien benötigt, an denen das FEP beteiligt ist“ (BUHMANN ET AL. 2010A, S. 20). Es wird unterschieden zwischen wahrscheinlich, wenig wahrscheinlich, nicht zu beachten (unwahrscheinlich) und Randbedingung (BUHMANN ET AL. 2010A).

Bemessung

Die Bemessung wird in dieser Arbeit als Teil der Auslegung gesehen. Sie umfasst die Bestimmung von Berechnungsverfahren und die Berechnung, um die physikalischen Größen und Kriterien numerisch festzulegen, die innerhalb der ingenieurtechnischen Nachweisführung unter Einbezug des ingenieurtechnischen Sicherheitskonzeptes zur Bewertung und Optimierung der Stabilität, Integrität und Funktionalität der Bauwerkskonstruktion herangezogen werden.

Bei der Bemessung werden meist regulatorische und normative Vorgaben genutzt, aber auch auf Erfahrungswerte zurückgegriffen. Bemessungsgrundlagen und -verfahren werden in nationalen und internationalen Normen und Empfehlungen vorgeschlagen.

Bemessungskriterien

Bemessungskriterien sind „quantitative Aussagen, welche die für jeden Grenzzustand zu erfüllenden Bedingungen beschreiben“ (DIN EN 1990 2010, S. 12).

Bemessungssituation

Eine Bemessungssituation umfasst „eine Reihe von physikalischen Bedingungen, [die] ersatzweise für die wirklichen Bedingungen innerhalb eines bestimmten Zeitabschnittes angenommen werden können, für die die Tragwerksplanung nachweist, dass maßgebende Grenzzustände nicht überschritten werden“ (DIN EN 1990 2010, S.12). Es wird in vorübergehende, ständige und außergewöhnliche Bemessungssituationen sowie einer Bemessungssituation mit Erdbeben unterschieden (DIN EN 1990 2010).

Bemessungswert

Bemessungswerte sind Werte, die aus der Berechnung von repräsentativen Werten oder charakteristischen Werten und einem Sicherheitsfaktor hervorgehen. In der DIN EN 1990 (2010) werden folgende Bemessungswerte beschrieben:

1. der Bemessungswert einer Einwirkung, ist der „Wert einer Einwirkung, der durch Multiplikation des repräsentativen Wertes mit dem Teilsicherheitsbeiwert ermittelt wird“ (DIN EN 1990 2010 - 1.5.3.21, S. 17)
2. der Bemessungswert einer Bauteileigenschaft (oder Baustoff- oder Produkteigenschaft) kann durch Division des charakteristischen Wertes der Baustoffeigenschaft (oder einer Bauteileigenschaft) mit dem Teilsicherheitsbeiwert gebildet oder direkt bestimmt werden (DIN EN 1990 2010 - 1.5.4.2).
3. der Bemessungswert einer geometrischen Größe ist im Allgemeinen der Nennwert oder der charakteristische Wert (DIN EN 1990 2010 – 1.5.5.2). „Im Bedarfsfall kann der Bemessungswert auch aus statistischen Auswertungen mit einer Fraktile bestimmt werden, die über die Fraktile des charakteristischen Wertes hinausgeht“ (DIN EN 1990 2010 - 1.5.5.2, S. 18)

Beständigkeit

Durch die Beständigkeit wird die Widerstandsfähigkeit von Werkstoffen/Materialien gegenüber chemischen, thermischen, hydraulischen und biologischen Einwirkungen beschrieben. Sie bezieht sich damit auf die Materialsicherheit. Ein Beständigkeitsnachweis für ein Streckenverschlussbauwerk umfasst die Betrachtung dahingehender Lastfälle, unter denen die Dicht- und Tragfähigkeit eines Bauwerks erhalten bleibt (GDA 1997 / DAFSTB 2011, siehe auch Anhang C)

Charakteristischer Wert

Der charakteristische Wert ist ein repräsentativer Wert einer Einwirkung oder Eigenschaft, der in eine probabilistische Zuverlässigkeitsanalyse einfließt (z.B. Erwartungswert oder 95% Quantil).

Dauerhaftigkeit

Die Dauerhaftigkeit ist eine Anforderung an ein zu errichtendes Bauwerk (bzw. einzelner Bauteile), um über den geplanten Nutzungszeitraum sicherzustellen, „dass zeitabhängige Veränderungen der Eigenschaften das Verhalten des Tragwerkes nicht unvorhergesehen verändern“ (DIN EN 1990 2010, S. 25). So ist bspw. die Abdichtung „im Bereich von Durchdringungen, Übergängen und An- und Abschlüssen so auszuführen oder abzudecken, dass vorhersehbare Nutzungsbeanspruchungen oder Lage- und Längenänderungen [auch von angrenzender Schutzschichten und Beläge] nicht zu Beschädigungen oder zu einem frühzeitigen Versagen führen“ (DIN 18195-9 2010, S.5). (siehe Anhang C)

Dichtelement

Ein Dichtelement „hat die Aufgabe, gegen das Eindringen/Austreten von Fluiden einerseits und den Transport von Radionukliden andererseits zu wirken“ (MÖNIG ET AL. 2012, S. 72).

Dichtigkeit

Die Dichtigkeit (auch Dichtheit) ist eine Eigenschaft und eine Anforderung an ein Verschlussbauwerk. Sie beschreibt die Vermeidung bzw. Verminderung eines Lösungszutrittes oder Schadstoffaustrittes unter besonderer Berücksichtigung der Empfindlichkeit von Fehlstellen (u.a. Trennflächen), die zum Verlust der Dichtigkeit innerhalb des Tragwerkes oder zu Umläufigkeiten führen können (GDA 1997). „Durchdringungen, Übergänge und An- und Abschlüsse müssen, erforderlichenfalls mit Hilfe [von Einbauten kompensiert werden, die] so geplant und hergestellt [werden], dass sie nicht hinter- oder unterlaufen werden können“ (DIN 18195-9 2010, S.5). (siehe Anhang C)

Einschlusswirksamer Gebirgsbereich

„Der einschlusswirksame Gebirgsbereich ist der Teil des Endlagersystems, der im Zusammenwirken mit den technischen Verschlüssen den Einschluss der Abfälle sicherstellt“ (BMU 2010, S. 5). In einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich muss sichergestellt sein, dass keine Wegsamkeiten bestehen oder sich ausbilden können. Innerhalb der VSG wurde vorerst von einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich ausgegangen, der eine Ausdehnung von 50 m zwischen dem Endlagerbergwerk und den geologischen Strukturen außerhalb des Hauptsalzes besitzt (FISCHER-APPELT ET AL. 2013). Die durch die Endlagerauffahrung bedingte Verletzung des Bereiches soll in diesem Zusammenhang durch technische und geotechnische Barrieren gesichert werden. Der einschlusswirksame Gebirgsbereich erstreckt sich bis zur Außenfläche der Streckenverschlüsse auf der Seite des Infrastrukturbereichs (FISCHER-APPELT ET AL. 2013).

Einwirkung

Einwirkungen sind Prozesse und Ereignisse, aus denen Kräfte resultieren, die eine Wirkung auf ein Barrierebauwerk ausüben und dessen Funktionsfähigkeit beeinträchtigen können. Dabei sind grundsätzlich direkte und indirekte Einwirkungen zu unterscheiden. In dieser Arbeit werden die Definitionen der Langzeitsicherheit den beiden Begriffen zugrunde gelegt¹. Direkte Einwirkungen umfassen dabei Prozesse und Ereignisse, die unmittelbar auf ein Barrierebauwerk wirken und

¹ Die Definitionen im Bauwesen beschreiben Einwirkungen als Kraft- und Verformungsgrößen bei denen direkte Einwirkungen als Lasteinwirkungen, die auf ein Tragwerk wirken, und indirekte Einwirkungen als aufgezwungene Verformungen oder Beschleunigungen, bspw. hervorgerufen durch Veränderungen der Temperatur und Feuchtigkeit oder durch Erdbeben, beschrieben werden (DIN EN 1990 2010 und NOVÁK ET AL. 2012).

dabei ursächlich die Funktion der Barrieren beeinträchtigt (BUHMANN ET AL. 2010A). Indirekte Einwirkungen sind Einwirkungen, aus denen wenigstens eine direkte Einwirkung resultiert oder beeinflusst wird (BUHMANN ET AL. 2010A). Zusätzlich können diese grundsätzlichen Einwirkungsarten hinsichtlich der Auftretenshäufigkeit differenziert werden (ständig, veränderlich, außergewöhnlich) (DIN EN 1990 2010 / NOVÁK ET AL. 2012).

FEP

Das englische Akronym FEP steht für Features, Events und Processes (deutsch Merkmale, Ereignisse und Prozesse). Die Zusammenstellung solcher FEP (FEP-Katalog) repräsentiert die Gesamtheit des Wissensstands zu einem Standort und zeigt alle Faktoren auf, die auf ein Endlagersystem möglicherweise Einfluss nehmen können (MÖNIG ET AL. 2012 / WOLF ET AL. 2012B).

Funktionsindikator

Funktionsindikatoren sind numerische Werte, die Auskunft darüber geben, ob bzw. in wie weit eine Sicherheitsfunktion gewährleistet ist. Die Werte werden durch Versuchsdurchführungen, Berechnungen und Modellierungen bestimmt und mit den jeweils vorgegebenen Grenzwerten oder Kriterien verglichen, oder anhand von geeigneten Entscheidungskriterien eingeordnet (SKB 2011 / OECD-NEA 2012A, B).

Gebrauchstauglichkeit

Die Gebrauchstauglichkeit beschreibt die Funktionsfähigkeit eines Tragwerkes und erfordert u.a. die Nachweise über den Erhalt der Funktion des Tragwerkes bei Verschiebungen und Verformungen als auch über eventuelle Schäden, die die Dauerhaftigkeit des Bauwerks nachteilig beeinflussen können (DIN EN 1990 2010). (siehe Anhang C)

Grenzzustand

Grenzzustände sind „Zustände, bei deren Überschreitung das Tragwerk die Entwurfsanforderungen nicht mehr erfüllt“ (DIN EN 1990 2010, S. 13). Die Grenzzustände der Tragfähigkeit stehen „im Zusammenhang mit dem Einsturz oder mit anderen Formen des Tragwerksversagens“ (DIN EN 1990 2010, S. 13). Sie entsprechen im Allgemeinen dem größten Tragwiderstand des Tragwerks. Die Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit sind „Zustände, bei deren Überschreitung die festgelegten Bedingungen für die Gebrauchstauglichkeit eines Tragwerks nicht mehr erfüllt sind“ (DIN EN 1990 2010, S. 14).

Indikator

„Bewertungsgröße zur Beurteilung einer Eigenschaft“ (MÖNIG ET AL. 2012, S. 75).

Integrität

„Der Begriff Integrität [Unversehrtheit] beschreibt das Vorliegen der einschlusswirksamen Eigenschaften einer Barriere“ (MÖNIG ET AL. 2012, S. 75).

Intensität

Die Intensität sagt aus, wie hoch die Wirkungsstärke einer Einwirkungen / Auswirkung ist.

Kanalisation

„Unter Kanalisation wird die Ausbildung von Wegsamkeiten [bzw. Fließwegen, Kanälen] verstanden, in denen sich ein strömendes Medium gegenüber seiner Umgebung bevorzugt ausbreiten kann“ (BUHMANN ET AL. 2010A, S. 312).

Langzeitsicherheitsnachweis

Der Langzeitsicherheitsnachweis (LSN) besteht aus einer Zusammenführung aller quantitativer und qualitativer Analysen und Argumente zur Begründung der Sicherheit für die Nachbetriebsphase eines Endlagersystems (BUHMANN ET AL. 2010A). Einen wichtigen Beitrag für den Langzeitsicherheitsnachweis liefert die Langzeitsicherheitsanalyse (siehe Sicherheitsanalyse).

Langzeitsichere Auslegung

Eine langzeitsichere Auslegung ist eine Erweiterung der Auslegung eines geotechnischen Bauwerks um die aus den Langzeitsicherheitsbetrachtungen abgeleitete Lebensdauer und zusätzlich zu betrachtenden Lastfälle. Dadurch wird die Funktionstüchtigkeit des geotechnischen Bauwerks auch für sehr lange Zeiträume und unter der Berücksichtigung aller relevanten langfristig auftretenden Einwirkungen garantiert.

Multibarrierensystem

Das Multibarrierensystem oder Mehrbarrierensystem ist ein System, dass sich aus mehreren unterschiedlichen Barrieretypen (geologische Barriere, geotechnische Barriere, technische Barriere) zusammensetzt. „Das Mehrbarrierenprinzip folgt den üblichen Prinzipien der Redundanz (doppelte Sicherheitssysteme) und Diversität (unabhängige Wirkungsmechanismen)“ (BMUB 2014). „Dabei sind das Gefährdungspotenzial der Abfälle und die unterschiedliche Wirkung der Barrieren in den verschiedenen Zeitbereichen zu berücksichtigen. Die Sicherheit des Endlagers nach seiner Stilllegung ist demnach durch ein robustes, gestaffeltes Barriersystem sicherzustellen, das seine Funktionen passiv und wartungsfrei erfüllt und das seine Funktionstüchtigkeit selbst für den Fall in ausreichendem Maße beibehält, falls einzelne Barrieren nicht ihre volle Wirkung entfalten“ (BMU 2010, Abschnitt 8.7)

Nachweiszeitraum

Ist der Zeitraum in der die Sicherheit der einzelnen Barriere oder des Gesamtsystems nachzuweisen ist.

Nachsorgefreiheit

Nachsorgefreiheit bedeutet, dass in der Nachverschlussphase weder Wartungsarbeiten noch andere Nachbesserungen im Endlager und somit auch an den geotechnischen oder technischen Barrieren weder nötig noch möglich sind. Es werden auch keine regulierenden Eingriffe in das Endlagersystem mehr vorgesehen (GRS 2012).

Nennwert

Ein Nennwert ist „ein Wert, der nicht auf einer statistischen Grundlage ausgewiesen ist, sondern z.B. aufgrund von Erfahrungen oder physikalischen Bedingungen“ festgelegt wird (DIN EN 1990 2010, S. 15).

Redundanz

Redundanz bedeutet das aus Sicherheitsgründen mehrfache Vorhandensein funktional gleicher oder vergleichbarer Mechanismen, auch wenn diese für den störungsfreien Normalbetrieb nicht benötigt werden (wikipedia, Zugriff Mai 2014). Im Bereich der Endlagerung radioaktiver Abfälle ist darunter das Prinzip der doppelten Sicherheitssysteme zu verstehen (BMUB 2014).

Referenzszenarium

„Das Referenzszenarium beschreibt eine möglichst große Gesamtheit als wahrscheinlich anzusehender, möglicher Entwicklungen des Endlagersystems“ (MÖNIG ET AL. 2012, S. 76). Dabei werden alle als wahrscheinlich anzusehende FEP einbezogen, die eine direkte Beeinträchtigung

der Funktion der einschlusswirksamen Barrieren mit sich ziehen, aber auch alle FEP, die die Mobilisierung von Radionukliden aus den Abfällen und ihren Transport bestimmen. Die Ausprägung dieser FEP ergibt sich aus den kausal mit ihnen verbundenen wahrscheinlichen FEP, wobei jeweils deren wahrscheinliche Ausprägungen zu Grunde gelegt werden (MÖNIG ET AL. 2012).

Schutzziel

Schutzziele sind Ziele zum Erhalt der Schutzgüter.

„Schutzgut bezeichnet das rechtlich geschützte Interesse einzelner Menschen oder Rechtspersonen, und der Gesellschaft als solcher. Als Schutzgüter werden im Zusammenhang mit der Bewertung von Auswirkungen der Endlagerung die Dinge oder Aspekte, d. h. umweltbezogene Schutzgüter, angesehen, die von den Schadstoffen beeinträchtigt werden können. Schutzgüter sind die Menschen, einschließlich der menschlichen Gesundheit, Tiere, Pflanzen und die biologische Vielfalt, Boden, Wasser, Luft, Klima, Landschaft, Kultur- und sonstige Sachgüter sowie die Wechselwirkung zwischen diesen“ (MÖNIG ET AL. 2012, S. 77).

Sicherheit

„Fähigkeit des Tragwerks zur Sicherstellung von Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit, die eine Gefährdung der öffentlichen Sicherheit und Ordnung verhindern“ (DIN 1055-100 2001, S.10). „Die Sicherheit des Systems im technischen Sinn ist gewährleistet, wenn die Sicherheitsanforderungen erfüllt sind“ (BMU 2010, S. 7).

Sicherer Einschluss

„Als sicherer Einschluss wird der Zustand des Endlagersystems bezeichnet, bei dem es im Nachweiszeitraum allenfalls zu einer geringfügigen Freisetzung von Radionukliden aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich kommt“ (MÖNIG ET AL. 2012, S. 77). „Mit Hilfe geologischer und geotechnischer Barrieren [werden] die Freisetzung und der Transport von Radionukliden soweit behindert [...], dass im Nachweiszeitraum die vorgegebenen Bewertungskriterien [und Schutzziele] eingehalten werden“ (BUHMANN ET AL. 2010A, S. 14).

Sicherheitsanalyse

„In der Sicherheitsanalyse wird das Verhalten des Endlagersystems unter den verschiedensten Belastungssituationen und unter Berücksichtigung von Datenunsicherheiten, Fehlfunktionen sowie zukünftigen Entwicklungsmöglichkeiten im Hinblick auf die Sicherheitsfunktionen analysiert. Sie endet mit einer Einschätzung der Zuverlässigkeit der Erfüllung der Sicherheitsfunktionen und damit auch der Robustheit des Endlagers“ (BMU 2010, S. 7).

„Die Langzeitsicherheitsanalyse ist die standortspezifische quantitative Analyse der Funktion eines Endlagersystems [nach dessen Verschluss]. Sie umfasst die Entwicklung konzeptioneller Modelle, die Szenarienentwicklung, die Konsequenzenanalyse sowie den Vergleich der Ergebnisse mit vorgegebenen Schutzzielen und liefert einen wichtigen Beitrag für den Langzeitsicherheitsnachweis“ (BUHMANN ET AL. 2010A, S. 26).

Sicherheitsfunktion

„Eine Sicherheitsfunktion ist eine Eigenschaft oder ein im Endlagersystem ablaufender Prozess, die bzw. der in einem sicherheitsbezogenen System oder Teilsystem oder bei einer Einzelkomponente die Erfüllung der sicherheitsrelevanten Anforderungen gewährleistet. Durch das Zusammenwirken solcher Funktionen wird die Erfüllung aller sicherheitstechnischen Anforderungen sowohl in der Betriebsphase als auch in der Nachverschlussphase des Endlagers gewährleistet“ (BMU 2010, S. 7). „Eine Barriere kann verschiedene Sicherheitsfunktionen wahrnehmen. Die Sicherheitsfunktion einer Barriere kann eine physikalische oder chemische Eigenschaft oder ein physikalischer oder chemischer Prozess sein. Beispielsweise können die Ver- oder Behinderung

des Zutritts von Flüssigkeiten zu den Abfällen oder der Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs vor Erosion Sicherheitsfunktionen sein“ (BMU 2010, S. 4).

Sicherheitsfunktionen werden im Sicherheitskonzept festgelegt. Ihre Einhaltung führt zu einer Risikominimierung mit dem Ziel, einen sicheren Anlagenzustand zu erreichen bzw. aufrecht zu erhalten.

Sorelbeton

Der ursprüngliche von Sorel entwickelte Sorelbeton ist ein kieselsäurefreies Bindemittelsystem auf $\text{MgO-MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$ Basis. Er wird aus Magnesiumoxid und Magnesiumlösung hergestellt, wobei die Festigkeit aus dessen Reaktion zu Oxichloriden resultiert. Der im Endlagerbereich eingesetzte Sorelbeton ist ein spezieller Bergbaubeton, bei dem die Zusammensetzung des ursprünglichen Sorelbetons um den Zuschlagsstoff Steinsalz (Salzgrus) erweitert wurde. Der hauptsächliche Unterschied zu anderen im Bergbau eingesetzten Baustoffen wie Salz- oder Solebeton liegt aufgrund der Baustoffmischung ohne Zementzusätze (z.B. Portlandzement) im Bindemittel. Ähnlichkeiten finden sich z.B. zu Salzbeton durch einen ähnlich hohen Salzgruszuschlag (ca. 60%).

In dieser Arbeit wird unter dem Begriff Sorelbeton der spezielle Bergbaubeton verstanden, wenn nicht ausdrücklich auf den ursprünglichen Sorelbeton hingewiesen wird.

Tragfähigkeit (Standssicherheit)

Die Tragfähigkeit (veraltet: Standssicherheit) beschreibt das Verhalten eines Abdichtungssystem bei mechanischer Belastung (GDA 1997). Dabei werden die Grenzzustände bei Verlust der Lagesicherheit, innerem Versagen (Materialermüdung) und Versagen durch Verformung betrachtet (DIN EN 1990 2010). (siehe Anhang C)

Tragwerk

Ein Tragwerk ist eine „planmäßige Anordnung miteinander verbundener Bauteile, die so entworfen sind, dass sie ein bestimmtes Maß an Tragfähigkeit und Steifigkeit aufweisen“ (DIN EN 1990 2010 – 1.5.1.6, S. 12).

Vorbemessung

Da eine endgültige Bemessung erst nach Festlegung aller Eingangs- und Randparameter vor dem Hintergrund eines vollständigen Nachweises der langzeitsicheren Funktionstüchtigkeit erfolgen kann, wird während der Planungen das Bauwerk vordimensioniert. Dabei können vereinfachte Modellannahmen als auch überschlägige Annahmen bei den Einwirkungen, Widerständen und geometrischen Abmessungen angewandt werden. Ziel der Vorbemessung ist ein nachvollziehbarer Nachweis der geplanten Maßnahmen der Baudurchführung und der erforderlichen Sicherheit und Funktionalität des Bauwerks (MAGISTRAT 2008).

Zuverlässigkeit

Die Zuverlässigkeit ist die „Fähigkeit eines Tragwerks oder Bauteils die festgelegten Anforderungen innerhalb der geplanten Nutzungszeit zu erfüllen. Die Zuverlässigkeit wird i.d.R. durch probabilistische Größen ausgedrückt“ (DIN EN 1990 2010, S. 14). Sie gilt daher als Maß für die Tragsicherheit, die Gebrauchstauglichkeit und die Dauerhaftigkeit eines Tragwerks. (siehe Anhang C)

3 Prinzipien und Grundsätze zur Langzeitsicherheit von geologischen Tiefenlagern

In diesem Kapitel wird zunächst das Grundgerüst für die Anforderungen an die Langzeitsicherheitskonzepte und Nachweiskonzepte auf internationaler, europäischer und nationaler Ebene dargelegt. Dies ist erforderlich, da insbesondere in der Bundesrepublik Deutschland nicht nur die nationalen Sicherheitsbelange, sondern auch die Vorgaben der europäischen Kommission sowie die Empfehlungen der OECD-NEA und der ICRP als auch die IAEA Safety Standards (z.B. IAEA SSG-23 2012) Berücksichtigung finden sollen.

3.1 Internationale Prinzipien und Grundsätze

In Bezug auf die Langzeitsicherheit geologischer Tiefenlager gibt es eine Vielzahl von Prinzipien, Grundsätzen und Anforderungen, welche den Ausgangspunkt für die Herleitung nationaler sicherheitstechnischer Kriterien bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle bilden.

Die **Internationale Strahlenschutzkommission** (*International Commission on Radiological Protection, ICRP*) ist eine internationale Fachkommission, die bisher mehrere vielbeachtete Veröffentlichungen vorgelegt hat, in denen Empfehlungen für den radiologischen Schutz der Biosphäre vor langlebigen radioaktiven Abfällen gegeben werden (ICRP 2007, 2008, 2009, 2010). In der ICRP-Empfehlung ICRP (2013) (s. auch als Zusammenfassung WEISS 2012) wurden die vorangegangenen ICRP-Empfehlungen (ICRP 1985, 1997, 1998) bezüglich fester radioaktiver Stoffe zusammengefasst, konsolidiert und aktualisiert sowie radiologische Schutzziele für die geologische Tiefenlagerung definiert. Dabei werden unterschiedliche Stadien der langzeitlichen Entsorgung in tiefen geologischen Formationen aufgeführt und die anzuwendenden Grundsätze der jeweiligen radiologischen Schutzmaßnahmen benannt. Hinsichtlich des radiologischen Schutzes der Biosphäre verweist WEISS (2012) darauf, dass unterschiedliche zeitliche Aspekte des Entsorgungsprozesses, d.h. während des Betriebes und der Schließung als auch in der Nachbetriebsphase, betrachtet werden müssen. Diese Betrachtungsweise ist prinzipiell mit den Aussagen von Publikationen der IAEA konform.

Die quantitativen Schutzziele der ICRP werden als Dosis- oder Risiko-Richtwerte von der **Internationalen Atomenergieorganisation** (*International Atomic Energy Agency, IAEA*) in ihren Empfehlungen und Regelwerken übernommen. Als eine autonome wissenschaftlich-technische Organisation, welche durch ein separates Abkommen innerhalb des Systems der Vereinten Nationen einen besonderen Status inne hat, verfolgt sie durch eine internationale Zusammenarbeit mit vielen weltweiten Partnern laut ihrer Satzung das Ziel, durch die (nicht-militärischen) Nutzung der Kernenergie zur Vergrößerung und Beschleunigung des Friedens, der Gesundheit und des Wohlstands in der Welt beizutragen.

Die IAEA hat in den vergangenen zwei Jahrzehnten insbesondere für ihre Mitgliedstaaten eine Fülle von Publikationen zur Behandlung und Entsorgung radioaktiver Abfälle vorgelegt. Die letzten größeren Publikationen, der Specific Safety Guide SSG-23 (IAEA 2012) sowie die Safety Requirements SSR-5 (IAEA 2011) und weitere darin zitierte Publikationen betonen bezüglich der aufgestellten Sicherheitsgrundlagen (safety fundamentals), Sicherheitsanforderungen (safety requirements) und Sicherheitsrichtlinien (safety guides) die Notwendigkeit umfassender wissenschaftsintegrierter und technisch umsetzbarer Planungsschritte. Hinsichtlich der Sicherheitsgrundlagen wird dabei immer wieder nachdrücklich darauf hingewiesen, dass der Schutz der Umwelt und des Menschen bei den Anforderungen und der Umsetzung absoluten Vorrang haben

soll. Die sich daraus ergebenden Anforderungen sind wiederum die Grundlage für alle Konzepte der Entsorgung radioaktiver Abfälle, insbesondere auch deren Entsorgung in tiefen geologischen Formationen.

Hinsichtlich der Entsorgung radioaktiver Abfälle werden im Bericht IAEA (1995) folgende grundlegende Prinzipien im Abfallmanagement festgelegt:

- Radioaktive Abfälle sind so zu entsorgen, dass der Schutz des Menschen sichergestellt und der Schutz der Umwelt gewährleistet wird.
- Radioaktive Abfälle sind so zu entsorgen, dass mögliche grenzübergreifende Auswirkungen auf Mensch und Umwelt berücksichtigt werden.
- Radioaktive Abfälle sind so zu entsorgen, dass die erwarteten Auswirkungen auf die Gesundheit zukünftiger Generationen nicht größer sind als jene, die heute zulässig sind.
- Radioaktive Abfälle sind so zu entsorgen, dass den zukünftigen Generationen keine unzumutbare Last auferlegt wird.
- Die Entsorgung radioaktiver Abfälle ist durch eine geeignete nationale Gesetzgebung mit klarer Zuweisung der Verantwortlichkeiten und Sicherstellung einer unabhängigen behördlichen Aufsicht zu regeln.
- Die erzeugte Menge an radioaktiven Abfällen ist so klein wie möglich zu halten.
- Bei allen Schritten der Erzeugung und Entsorgung radioaktiver Abfälle sind die gegenseitigen Abhängigkeiten angemessen zu berücksichtigen.
- Die Sicherheit der Anlagen zur Entsorgung radioaktiver Abfälle ist während ihrer Lebensdauer angemessen zu gewährleisten.

Diese grundlegenden Prinzipien galten lange Zeit als Sicherheitsgrundlagen (safety fundamentals), bevor sie 2006 durch folgende zehn allgemeineren (für alle Bereiche der nuklearen Sicherheit formulierten) Sicherheitsgrundlagen überschrieben wurden (IAEA 2006 / vgl. Anhang A):

- Sicherheitsverantwortung,
- Rolle der Regierung,
- Führungs- und Sicherheitsmanagement,
- Begründung von Möglichkeiten und Maßnahmen,
- Optimierung der Schutzvorrichtungen,
- Eingrenzung der Risiken für Personen,
- Schutz derzeitiger und zukünftiger Generationen,
- Vorsorge gegen Unfälle,
- Notfallvorsorge,
- zielgerichtete Maßnahmen zur Reduzierung von bestehenden und unkontrollierten Strahlungsrisiken.

Obwohl die Forderungen des Abfallentsorgungsmanagements nach IAEA (1995) nicht mehr offiziell als Sicherheitsgrundlagen gelten, sind sie dennoch von großer Bedeutung, da sich viele von ihnen, zusammen mit einigen der zehn Sicherheitsgrundlagen nach IAEA (2006), in der Joint Convention (GESETZ ZUM ÜBEREINKOMMEN ÜBER NUKLEARE ENTSORGUNG 1997) wiederfinden, die ihrerseits für ihre Unterzeichnerstaaten, somit auch für Deutschland, eine bindende Wirkung besitzt.

Im IAEA Dokument SSR-5 (IAEA 2011) werden detailliertere Anforderungen (safety requirements) an die Sicherheit der Endlagerung definiert (vgl. Anhang I). Um die IAEA-Sicherheitsgrundlagen zu erreichen, müssen demnach Beurteilungen zur Standortauswahl und Standortbewertung, zur Auslegung und Konstruktion sowie zum Betrieb und der Schließung des Endlagers erfolgen. Die von der IAEA bevorzugte Strategie für die Entsorgung radioaktiver Abfälle ist ihre Isolation von der

Biosphäre, indem die Radionuklide sicher in der Abfallmatrix, den Abfallgebinden und im Einlagerungsbereich eingeschlossen werden. Es wird darauf hingewiesen, dass auch die Migration von Radionukliden innerhalb des Endlagers so weit wie möglich verhindert, reduziert oder mindestens verlangsamt werden muss. Dies entspricht einem „sicheren Einschluss“ (MÖNIG ET AL. 2012, S.9). Die IAEA (IAEA 2011, Kapitel 1 Punkt 12) weist darauf hin, dass ein vollständiger Einschluss und damit auch eine vollständige Isolation radioaktiver Abfälle während des gesamten Nachweiszeitraums weder umsetzbar noch notwendig ist. Durch diese Aussage ist laut der IAEA, im Gegensatz zum vollständigen Einschluss, eine begrenzte, aber nicht gesundheitsgefährdende Austrittsmenge in die Biosphäre akzeptierbar. Zur Gewährleistung eines sicheren Einschlusses und der damit verbundenen Sicherheitsfunktionen schlägt die IAEA ein Mehrbarrierensystem (siehe Kapitel 3.3) vor.

In den Sicherheitsleitlinien (safety guides) werden Leitlinien für die Umsetzung der jeweiligen Sicherheitsanforderungen beschrieben. Sie präsentieren die auf internationalem Konsens beruhende favorisierte Praxis und bieten damit Empfehlungen und Anleitungen für durchzuführende Maßnahmen an, um die Sicherheitsanforderungen zu erfüllen. Dies kann spezifische Nachweiskriterien zur Standortauswahl oder Konzipierung des Endlagers umfassen oder Vorgehensweisen der Methodik für die Zusammenführung von Erkundung, Forschung, Entwicklung und Analyse innerhalb eines „Safety Case“² anbieten (IAEA 2012).

Die **Nuclear Energy Agency (NEA)**, eine halb-autonome Institution innerhalb der internationalen **Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD)**, befasst sich mit der Förderung einer sicheren, umweltschonenden und wirtschaftlichen Nutzung der Kernenergie und ist an der Entwicklung der Safety Standards der IAEA (z.B. des Safety Cases) beteiligt.

Die OECD-NEA verdeutlicht in der Publikation „The Nature and Purpose of the Post-closure Safety Cases for Geological Repositories“ (OECD-NEA 2013) die Notwendigkeit, die Analysen und Verfahrensweisen sowie Argumentationsketten für die Nachbetriebsphase eines Endlagers in tiefen geologischen Formationen in Form eines Safety Case zusammenzutragen, um die Sicherheit einer langzeitsicheren Endlagerung bewerten zu können. Es wird das Problem angesprochen, dass frühere Safety Cases, bspw. bei der Unterstützung einer frühen Standortcharakterisierung, eher auf allgemeine Annahmen von Wirtsgesteinseigenschaften und dem Endlagerentwurf angewiesen waren, wohingegen eine Genehmigung eines Endlagers einen Safety Case mit ausreichender Faktenbasis und Einzelheiten verlangt, um die notwendige Zuverlässigkeit und damit die Sicherheit des Endlagers zu repräsentieren. Daher ist der Safety Case entsprechend der schrittweisen Entwicklung eines Endlagerprogramms weiter fortzuschreiben. Er dient als Grundlage für Entscheidungen und zeigt die Ungewissheiten und den daraus resultierenden Forschungs- und Entwicklungsbedarf im jeweiligen Schritt auf. Dahingehend stellt die OECD-NEA den Anspruch, dass bei einem Safety Case für langlebige radioaktive Abfälle umfassendes Referenzmaterial in Form von Analysen und kritischen Berichten für die verantwortlichen Institutionen und Entscheidungsträgern bereitgestellt werden soll, und betont, dass der Safety

²Der Safety Case ist ein strukturiertes, umfassendes und vertretbares Dokument, dass bei einem schrittweisen Vorgehen alle Argumente und Entscheidungsgrundlagen in einer bestimmten Entwicklungsphase zusammenführt und damit den Entwicklungsstand von Endlagerprojekten, der Ableitung von Sicherheits- und Vertrauensaussagen und der Ableitung von Schlussfolgerungen zum weiteren Vorgehen (bspw. Erkundung, Forschung und Entwicklung, Betriebsbeginn) darlegt. Er ist damit ein wichtiges Hilfsmittel zur Ermittlung noch offener wissenschaftlicher und technischer Fragestellungen sowie wirtschaftlicher Gesichtspunkte. Gebunden an spezielle Anforderungen des jeweiligen Standortes und des entsprechend favorisierten Wirtsgesteins (Ton, Granit, Salz) wurden auf europäischer Ebene Safety Cases erstellt. So sind beispielsweise in Deutschland im Rahmen der VSG grundlegende Teile eines Safety Cases für den Standort Gorleben für das Wirtsgestein Salz erstellt worden. Ähnliches wurde auch in der Schweiz und in Frankreich für die Endlagerung in Tonformationen durchgeführt (HSK 2007 / ENSI 2010 / ANDRA 2005). Die schwedische Endlagerorganisation SKB erarbeitete einen Safety Case für die Endlagerung in Granit (SKB 2011).

Case die mögliche Entwicklung in der geologischen Formation und dem technischen Endlagersystem mit ausreichender langzeitsicherer Zuverlässigkeit aufzeigen muss (OECD-NEA 2012a).

Auf europäischer Ebene sind ebenfalls die Vorgaben der **Europäischen Kommission** hinsichtlich der verantwortungsvollen und sicheren Entsorgung hoch radioaktiver Abfälle einzubeziehen. So geben beispielsweise die Richtlinien 96/29/*EURATOM* (*EURATOM* 1996) und 2011/70/*EURATOM* (*EURATOM* 2011) grundlegende Anforderungen zur nuklearen Sicherheit und zur Entsorgung abgebrannter Brennelemente und radioaktiver Abfälle. Wichtig hierbei ist der formulierte Standpunkt, dass innerhalb der Europäischen Union ein Einverständnis darüber herrscht, dass nationale Vorkehrungen für die Sicherheit radioaktiver Brennelemente und Abfälle zu treffen sind, in dem Regulierungsinstrumente angewendet werden, die die Umsetzung der o.g. internationalen Ziele ermöglichen (*EURATOM* 2011, Vorwort Absatz 29). Hinsichtlich der Entsorgung radioaktiver Abfälle in geologischen Formationen soll besonders die Dokumentation der wissenschaftlichen und technischen Grundlagen ein verbessertes Verständnis der Aspekte bewirken, die die Sicherheit von Endlagersystemen bedingen. Es werden einschlägige Sicherheitsnachweise und -bewertungen gefordert.

3.2 Nationale Prinzipien und Grundsätze

Im Jahr 2002 hat der Arbeitskreis Endlagerung (AkEnd), unterstützt durch das BMU (BMUB), erstmals wissenschaftlich fundierte Auswahlkriterien für die Suche nach einem langzeitsicheren Endlagerstandort für radioaktiven Abfall aufgestellt (AkEnd 2002). Darin werden unter anderem Empfehlungen für die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen, das Mehrbarrierenprinzip, ein Isolationszeitraum von einer Million Jahre, die untertägige Untersuchung von mindestens zwei Standorten und die Beteiligung der Öffentlichkeit gegeben.

Das **Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)** hat allgemeine Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle herausgegeben (BMU 2010). Darin wird das nachweislich einzuhaltende notwendige Sicherheitsniveau zur Erfüllung der Anforderungen eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle in tiefen geologischen Formationen mit hohem Einschlussvermögen dargestellt.

Die Sicherheitsanforderungen enthalten insbesondere Festlegungen zu folgenden Punkten und können soweit zweckmäßig durch Leitlinien konkretisiert werden:

- mit der Endlagerung radioaktiver Abfälle verfolgte Schutzziele,
- zu beachtende Sicherheitsprinzipien,
- schrittweises Vorgehen und Optimierung bezüglich des Strahlenschutzes, der Betriebssicherheit und der Zuverlässigkeit des langzeitsicheren Einschlusses der Abfälle unter Berücksichtigung der Realisierbarkeit,
- Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlung,
- Anforderungen an Sicherheitsanalysen und ihre Bewertung für den Betrieb und die Langzeitsicherheit,
- Auslegungsanforderungen an das Sicherheitskonzept des Endlagers für die Betriebs- und Nachverschlussphase,
- das Sicherheitsmanagement für die Errichtung und den Betrieb des Endlagers
- Dokumentation des Endlagers.

Das BMU nimmt dabei die obengenannten Schutzziele (siehe IAEA, OECD-NEA, ICRP, Europäische Kommission) auf und stellt damit den dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt vor ionisierender Strahlung in den Mittelpunkt. Ebenso wie von internationalen Organisationen wird auch in den Sicherheitsanforderungen darauf hingewiesen, dass unzumutbare Lasten und Verpflichtungen für künftige Generationen vermieden werden sollen. Um diese übergeordneten Schutzziele zu erreichen, stellt das BMU (2010) folgende Sicherheitsprinzipien auf:

- Die radioaktiven und sonstigen Schadstoffe in den Abfällen müssen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich konzentriert und eingeschlossen und damit möglichst lange von der Biosphäre ferngehalten werden.
- Die Endlagerung muss sicherstellen, dass Freisetzungen radioaktiver Stoffe aus dem Endlager die aus der natürlichen Strahlenexposition resultierenden Risiken langfristig nur sehr wenig erhöhen.
- Die Endlagerung darf die Artenvielfalt nicht gefährden. Dabei wird davon ausgegangen, dass auch terrestrische Ökosysteme sowie andere Spezies in ihrer Art geschützt werden, wenn der Mensch als Individuum vor ionisierender Strahlung geschützt ist.
- Die anderweitige Nutzung der natürlichen Ressourcen darf nicht unnötig eingeschränkt werden.
- Die Auswirkungen der Endlagerung auf Mensch und Umwelt dürfen außerhalb der Grenzen Deutschlands nicht größer sein als innerhalb Deutschlands zulässig.
- Das Endlager ist so zu errichten und zu betreiben, dass für den zuverlässigen langfristigen Einschluss der radioaktiven Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgsbereich in der Nachverschlussphase keine Eingriffe oder Wartungsarbeiten erforderlich werden.
- Es ist eine möglichst zügige Errichtung des Endlagers zu realisieren.
- Für die Errichtung und den Betrieb, einschließlich Stilllegung des Endlagers, müssen die finanziellen Mittel zeitgerecht zur Verfügung stehen.

Für die Konzeption bzw. Auslegung eines Endlagers wird ein schrittweises Verfahren auf der Basis von Sicherheitsanalysen und Sicherheitsbewertungen für die Optimierung des Strahlenschutzes während der Betriebsphase, der Langzeitsicherheit, der Betriebssicherheit, der Zuverlässigkeit und Qualität des langfristigen Einschlusses der Abfälle, des Sicherheitsmanagements und der technischen sowie finanziellen Realisierbarkeit vorgeschlagen. Nachrangig soll das Endlager auch „mit Blick auf eine zuverlässige Isolation der radioaktiven Stoffe im Endlager vor zukünftigen menschlichen Aktivitäten“ optimiert werden (BMU 2010, S.10). Ein robustes Mehrbarrierensystem ist entscheidend für die Zuverlässigkeit des langzeitsicheren Einschlusses. Ausschlaggebend für den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlung in der Nachverschlussphase ist die Integrität eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und damit die Verhinderung oder Begrenzung der Radionuklidfreisetzung, die nur zu einer begrenzten effektiven Dosis im Jahr führen darf.

Die Langzeitsicherheitsnachweise sollen sich auf eine standortspezifische Sicherheitsanalyse und Sicherheitsbewertung, die einen Zeitraum von einer Million Jahre umfasst, stützen. Dabei wird eine vertrauenswürdige Bewertung gefordert, die u.a. das jeweils zugrunde liegende Endlagerkonzept, die qualitätsgesicherte Erhebung von Daten und Informationen aus Standorterkundung, Forschung und Entwicklung, die qualitätsgesicherte Umsetzbarkeit der Anforderungen an technische Barrieren, die Identifizierung, Charakterisierung und Modellierung sicherheitsrelevanter Prozesse sowie die diesbezügliche Vertrauensbildung und Qualifizierung der Modelle und die Darstellung und Umsetzung einer systematischen Strategie zur Identifizierung, Bewertung und Handhabung von Unsicherheiten enthalten soll.

Nach BMU (2010) muss die Bewertung der Langzeitsicherheit mindestens folgende Erkenntnisse einbeziehen:

- *Langzeitaussage zur Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs.* Auf der Grundlage einer geowissenschaftlichen Langzeitprognose ist für die wahrscheinlichen Entwicklungen nachzuweisen, dass die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs über den Nachweiszeitraum von einer Million Jahre sichergestellt ist.
- *Radiologische Langzeitaussage.* Die Einhaltung der festgelegten Dosiswerte ist für wahrscheinliche und weniger wahrscheinliche Entwicklungen nachzuweisen.
- *Nachweis der Robustheit technischer Komponenten des Endlagersystems.* Die langfristige Robustheit technischer Komponenten muss durch theoretische Überlegungen prognostiziert und sichergestellt werden.
- *Ausschluss von Kritikalität.* Es ist zu zeigen, dass bei wahrscheinlichen wie auch bei weniger wahrscheinlichen Entwicklungen sich selbsterhaltende Kettenreaktionen nicht auftreten.

Es ist vorgesehen, die Sicherstellung des Einschlussvermögens des Endlagers durch verschiedene Barrieren mit unterschiedlichen Sicherheitsfunktionen zu gewährleisten. Die geforderte Zuverlässigkeit des Einschlusses soll durch das Zusammenspiel dieser Barrieren in ihrer Redundanz und Diversität optimiert werden, wobei das Gefährdungspotenzial der eingelagerten Abfälle und die unterschiedliche Wirkung der Barrieren in den verschiedenen Zeitphasen zu berücksichtigen ist. Die (Langzeit-) Sicherheit des Endlagers ist demnach „durch ein robustes, gestaffeltes Barrierensystem [Mehrbarrierensystem] sicherzustellen, das seine Funktionen passiv und wartungsfrei erfüllt“ (BMU 2010, S.19). Dabei muss die Funktionstüchtigkeit des Barrierensystems auch bei nicht vollständiger Wirkung der einzelnen Barrieren garantiert sein.

3.3 Die Stellung des Streckenverschlussbauwerks innerhalb des Mehrbarrierensystems

Das Ziel des Mehrbarrienkonzepts ist, dass mehrere Barrieren einen Schadstoffaustrag aus dem Einlagerungsbereich der Abfälle im geforderten Isolationszeitraum wirkungsvoll verhindern sollen, wobei die Leistung der Barrieren in ihrer Wirkung als Gesamtsystem liegt (AKEND 2002). „Die einzelnen Komponenten des Systems müssen dabei aufeinander abgestimmt sein und sollen sich in ihrer zeitabhängigen Wirksamkeit ergänzen“ (AKEND 2002, Kap. 2.1.9, S. 35). Dabei darf auch bei einer verringerten Sicherheitsfunktion einer Barriere das Sicherheitsniveau des Gesamtsystems nicht beeinträchtigt werden (BMU 2010).

Das Mehrbarrierensystem eines Endlagers in tiefen geologischen Formationen umfasst:

- die technischen Barrieren (Abfallbehälter),
- die geotechnischen Barrieren (Versatz bzw. Puffer, Dichtungen, Strecken- und Schachtverschlüsse),
- die geologischen Barrieren (Wirtsgestein, Deckgebirge).

Die geotechnischen Barrieren werden mitunter nicht als eigenständige Kategorie dargestellt, sondern den technischen Barrieren zugeordnet (AKEND 2002 / GRUNDFELT ET AL. 2005).

Um eine durchgehend sichere Gewährleistung des Einschlusses der radioaktiven Abfälle während der Nachweiszeit von einer Million Jahre erreichen zu können, sollen die einzelnen Barrieren zeitspezifisch mit nachfolgender Überlappung ihre volle Wirksamkeit entfalten (MÖNIG ET AL. 2012).

Diesbezüglich müssen die technischen Barrieren (Abfallbehälter) besonders während der Betriebsphase, Stilllegung und der frühen Nachbetriebsphase (bis 500 Jahre) ihre Barriereleistung erbringen. Dies steht im Zusammenhang mit der in den Sicherheitsanforderungen des BMU (BMU 2010) ausgewiesenen Anforderung, die, anders als im internationalen Kontext, eine Bergungs- bzw. Rückholungsoption bis 500 Jahre nach Verschluss des Endlagers vorsieht.

Bei der Endlagerung im Steinsalz sollen die geotechnischen Barrieren (Verschlussysteme) während der Stilllegung und in der frühen Nachbetriebsphase die durch den Endlagerausbau beeinträchtigte Barrierefunktion des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches bzw. der geologischen Barriere solange sicherstellen, bis der eingebrachte Versatz (im Salzgestein Salzgrus) durch seine Kompaktion in Laufe der Zeit eine Durchlässigkeit des umgebenden Salzgesteins erreicht hat und die langzeitliche Sicherheit durch die geologische Barriere übernommen werden kann (MÖNIG ET AL. 2012).

Bis zu einer hinreichenden Kompaktion des Salzgrusversatzes besteht das Risiko eines möglichen Lösungszutritts über die ausbaubedingte Wegsamkeit des Schachtes und einer weiteren Migration der Fluide durch die Strecken zu den radioaktiven Abfällen. Ein Lösungszutritt könnte die Hohlräume mit Lösung füllen und eine Kompaktion des Versatzes und damit eine langzeitsichere Herstellung der Integrität der geologischen Barriere verhindern. Die geotechnischen Barrieren (Schachtverschlüsse, Streckenverschlüsse) sollen dem entgegen wirken. Dies gilt insbesondere für den Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches, in dem der anthropogen geschaffene Zugang zum Einlagerungsbereich bis zur abgeschlossenen Salzgruskompaktion durch Streckenverschlüsse versiegelt werden soll. Neben der Ver- bzw. Behinderung eines Lösungszutrittes von außen fungieren geotechnische Verschlussbauwerke auch als Absicherung gegen eine Freisetzung von Schadstoffen aus dem Einlagerungsbereich. Diesbezüglich müssen – ggf. abhängig von den Ergebnissen der Standorterkundung und der FEP-Analyse – neben der sich aus den radioaktiven Abfällen entwickelten Gasentwicklung auch interne Lösungszutritte³ in die im Einlagerungsbereich befindlichen Strecken in die Betrachtung einbezogen werden. Interne Lösungszutritte könnten durch nicht detektierte gering-volumige Lösungsansammlungen im Salzgestein oder durch großvolumigen Lösungsreservoir (z.B. im Anhydritbereich) bspw. über Riss- oder Störungsausbildungen infolge von Erdbeben oder unvermuteten neogenen Differenzialbewegungen erfolgen. Bei einem Lösungszutritt würden die technischen Barrieren (Abfallbehälter) einer erhöhten Korrosion unterliegen. Bei Kontakt mit den Abfällen könnte es über die noch nicht vom Versatz (Salzgrus) geschlossenen Strecken- und Schachtbereiche zu einem Austritt kontaminierter Fluide in die Biosphäre kommen.

Abgesehen von den Alternativ- oder What-if-Szenarien eines internen Lösungszutrittes und der eingeschränkten Wirksamkeit anderer Barrieren des Mehrbarrierensystems (Kompaktion des Salzgrusversatzes, bei Einlagerung beschädigte Abfallbehälter) sind die geotechnischen Barrieren für die Sicherheit gegen einen Lösungszutritt von außen und einen Austritt kontaminierter Gase durch die anthropogen geschaffenen Hohlräume maßgeblich. Bis zur Wirksamkeit des Salzgrusversatzes gewährleisten daher in der frühen Nachbetriebsphase ausschließlich die Schacht- und Streckenverschlüsse das geforderte Sicherheitsniveau in den Auffahrungsbereichen. Dies zeigt die Wichtigkeit einer gewissenhaften Auslegung der geotechnischen Barrieren. Im Fall einer eingeschränkten Funktion der Schachtverschlüsse würden die Streckenverschlüsse die Schutzziele des Gesamtsystems in der frühen Nachbetriebsphase sicherstellen müssen.

³ Im Wirtsgestein befindliche Lösungen

4 Streckenverschlussbauwerke – historische Entwicklung und auslegungsbestimmende Vorgaben

Das folgende Kapitel gibt einerseits einen Überblick über die schon vorhandenen und in der Literatur belegten technischen Konzeptionen von untertägigen Dammbauwerken bis zu derzeitig entwickelten Designentwürfen für Streckenverschlussbauwerke in einem Endlager für radioaktive Abfälle in Salzgesteinen, andererseits bietet es einen Abriss über die aktuellen normativen und regulatorischen Grundlagen, die ausschließlich im Zusammenhang mit der Auslegung eines Streckenverschlussbauwerks stehen. Die aufgeführten auslegungsbestimmenden Vorgaben beziehen sich in erster Linie auf nationale Gesetzestexte, Richtlinien und Empfehlungen, und spiegeln somit den derzeitigen Stand der internationalen Forderung nach einer innerstaatlichen Gesetzgebung unter Einbezug international anerkannter Kriterien und Normen zur Gewährleistung der Sicherheit des Menschen und der Umwelt wider (GESETZ ZU DEM ÜBEREINKOMMEN ÜBER NUKLEARE ENTSORGUNG 1997, Art 11 iv, Art 19 Satz 1). Dabei ist zu bedenken, dass dem Sicherheitsanspruch an ein Endlagergesamtsystem besonders in der frühen Nachbetriebsphase hauptsächlich durch die geotechnischen Barrieren Rechnung getragen wird (siehe Kapitel 3).

4.1 Design, Konstruktionsbeispiele und Konzepte

Streckenverschlussbauwerke (Abdichtungs- oder Dammbauwerke) werden im Bergbau eingesetzt, um bei einem plötzlichen oder vorhersehbaren Auftreten von Lösungsvolumina (z.B. Wassereintrich, Flutung) Grubenbereiche gegen das Ein- und Austreten von Lösungsmengen abzudichten. Für die Errichtung solcher Bauwerke werden Streckenbereiche ausgewählt, die einen strategisch günstigen Abdichtungsbereich im Streckenverbund bieten oder an denen ein Lösungszutritt aus dem Gebirge (instabile geologische Situation) auftritt bzw. zu erwarten ist. Die Dammbauwerke müssen einerseits eine Dichtfunktion erfüllen (Gebrauchstauglichkeit), andererseits den auftretenden Spannungen und Drücken des umgebenden Gebirges als auch aus dem Lösungszutritt standhalten (Tragfähigkeit).

LANGER (1995, 1996) beschreibt vier Grundformen von Dammbauwerken: den Paralleldamm, den Gewölbedamm (kalottenförmiger Damm), den Pfropfendamm (kegelförmiger Damm) und den verzahnten Damm (Abb. 1).

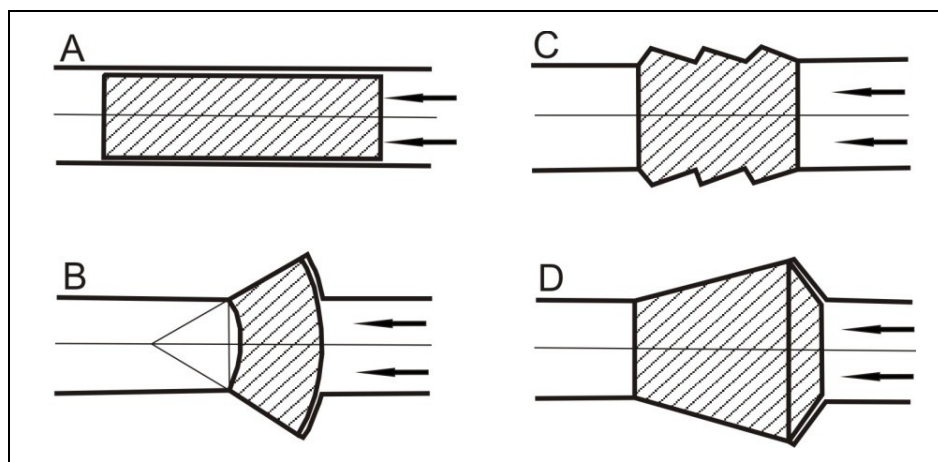


Abb. 1: Grundformen von Dammbauwerken (nach LANGER 1995 / 1996)
A = Paralleldamm, B = Gewölbedamm, C = verzahnter Damm, D = Pfropfendamm.

Der **Paralleldamm** (Abb. 1 A) wird aufgrund seiner relativ einfachen Herstellungsweise besonders häufig für kurzfristig zu errichtende Abdichtungsbauwerke bei absehbaren oder bereits eingetretenen Lösungseinbrüchen verwendet (XIE 2003). Die Übertragung der Kräfte des Lasteintrags durch eine einseitig anstehende Flüssigkeitssäule in das Gebirge erfolgt über die Reibung und Haftung der Grenzflächenfuge bzw. Kontaktzone zwischen Bauwerk und Gebirge (LANGER 1995 & 1996 / WITTKKE 1973 / XIE 2003). Bei hohem Druck können daher eine Verschiebung des Bauwerks und eine dadurch initiierte Undichtigkeit auftreten. Um Verschiebungen des Damms zu vermeiden, kann einerseits die Länge des Bauwerks erhöht werden (wobei teilweise sehr hohe, kaum vertretbare Dammlängen resultieren können), andererseits die Kontaktzone durch Hochdruckinjektionen mit Zement, Bitumen oder Injektionsmaterialien (z.B. Epoxyd- und Polyurethanharze, spezielle Mörtel, Wasserglas) verpresst werden, wodurch ein Verbund zwischen Bauwerk und Gebirge hergestellt wird (WITTKKE 1973). Dies bewirkt neben der erforderlichen Dichtigkeit nach WITTKKE (1973) auch eine Vorspannung zwischen Bauwerk und Gebirge, die die auftretenden Druck- und Schubspannungen direkt auf das Gebirge überträgt und dadurch die Länge des Bauwerks auf etwa die seines Durchmessers reduzieren kann. SITZ (1982) weist anhand seiner Spannungsermittlungen darauf hin, dass bei solchen gebirgsverbundenen Konstruktionen (kraftschlüssiger Verbund zwischen Bauwerk und Gebirge), unabhängig von der Geometrie, im gesamten Konstrukt Zugspannungen auftreten, die auch durch eine Dammverlängerung nicht wesentlich reduziert werden. Um diesen ungünstigen Beanspruchungszustand zu vermeiden schlägt er vor, auf einen kraftschlüssigen Verbund zu verzichten.

Im Gegensatz zum Paralleldamm ist die Herstellungsweise eines **Gewölbedamms** (kalottenförmiger Damm, Abb. 1 B) aufwendiger und es sind zusätzliche Ausbrucharbeiten notwendig (WITTKKE 1973). Der Lasteintrag durch eine einseitig anstehende Flüssigkeitssäule führt durch die Gewölbeform zu einer günstigen Druckbeanspruchung des Damms und überträgt die einwirkenden Kräfte relativ gleichmäßig in das Gebirge (LANGER 1995 & 1996 / XIE 2003). Maßgebend für die Tragfähigkeit des Damms sind die Druckfestigkeit des Gebirges und ein einseitig einwirkender Flüssigkeitsdruck (WITTKKE 1973 / SITZ 1982 / XIE 2003). Durch einen fehlenden Flüssigkeitsdruck bewirkt die Gebirgskonvergenz ungleichmäßige Spannungen im Bauwerk (XIE 2003). Dieser ungünstige Beanspruchungszustand kann zu Biegespannungen führen (SITZ 1982).

Die Herstellungsweise des **verzahnten Damms** (Abb. 1 C) ist gegenüber dem Paralleldamm aufwendiger, da mehrere Verzahnungen in das Gebirge vorgenommen werden müssen. Der Lasteintrag aus einer einseitig anstehenden Flüssigkeitssäule wird an den Stirnflächen der Zähne konzentriert auf das Gebirge übertragen (XIE 2003). Ebenso wie beim Gewölbedamm sind bei dieser Dammform die mechanischen Eigenschaften bzw. die Festigkeit des Gebirges maßgebend (XIE 2003). Allerdings treten, wie beim Gewölbedamm möglich, keine ungleichmäßigen Spannungen auf (XIE 2003). Jedoch können je nach Scherfestigkeit in der Grenzflächenfuge und der Geometrie der Zähne durch Kerbwirkungen im Bauwerk und im Gebirge Bereiche mit Zugspannungen auftreten (SITZ 1982 / LANGER 1995 & 1996), die durch eine Erhöhung der Bauwerkslänge verringert werden können (SITZ 1982). Eine Erhöhung der Dichtigkeit und Scherfestigkeit mittels kraftschlüssiger Firstverfüllungen ist bei dieser Dammform aufgrund des durch die Verzahnungen komplizierteren Designs problematisch.

Der **Pfropfendamm** (kegelförmiger Damm, Abb. 1 D) ist nach LANGER (1995 & 1996) am besten für größere Teufen und höhere Flüssigkeitsdrücke geeignet. Auch bei dieser Dammform sind beim Bau zusätzliche Ausbrucharbeiten notwendig (WITTKKE 1973). Die Übertragung der Kräfte des Lasteintrags durch eine einseitig anstehende Flüssigkeitssäule in das Gebirge erfolgt neben Reibung und Haftung insbesondere durch die Keilwirkung der konischen Form (LANGER 1995 & 1996 / WITTKKE 1973). Die Grenzflächenfuge zwischen Bauwerk und Gebirge steht

unter Druckspannungen, wodurch die abdichtende Funktion des Bauwerks verbessert wird (XIE 2003). Im Hinblick auf einen günstigen Beanspruchungszustand und einen geringen Mehrausbruch sind laut SITZ (1982) Neigungswinkel zwischen 9-15° vorteilhaft.

4.1.1 Streckenverschlussbauwerke im Salzbergbau

In der Jahrhunderten alten Tradition der untertägigen Gewinnung von natürlichen Rohstoffen in Deutschland wurden verschiedene Baukonzepte von Streckenverschlussbauwerken entwickelt. Dabei bewährte sich eine Kombination von verschiedenen Dammformen. Verbunden mit einer Trennung der Komponenten für die Abdichtung (Dichtelement) und die Lastabtragung (statisches Widerlager) als auch dem Einsatz unterschiedlicher Materialien wird dabei eine Optimierung von Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit verfolgt. Das Dichtelement gewährleistet dabei die für Abdichtungsbauwerke geforderte Permeabilität. Verwendete Materialien sind z.B. Salztone, Bitumen, Asphalt und Bentonit. Da Salztone und Bitumen neben ihrer ausgeprägten Dichtfunktion nur eine relativ geringe Tragfähigkeit aufweisen, wird durch das Zumischen von Sand oder Salzgrus versucht, eine mechanische Stabilisierung und damit die benötigte Festigkeit zu erreichen. Das Dichtmaterial Bentonit wird aufgrund seiner mineralogischen und chemischen Eigenschaften favorisiert. Untersuchungen zeigen, dass durch Einstellung verschiedener Bentonit-Quarzsandverhältnisse neben der benötigten Dichtigkeit durch die Bentonit-Quellfähigkeit auch die langzeitlichen Anforderungen an die Lastabtragung realisiert werden können (ALAND 1999). Das statische Widerlager bildet ein Verbundtragsystem mit dem Dichtelement und dem umgebenden Gebirge. Es kann aufgrund der Korrosionsanfälligkeit der Materialien, meist Zementbeton (teilweise Salzbeton), nur als Kurzzeitdichtung wirken. Die Hauptaufgabe des Widerlagers besteht darin, auftretende Lasten durch die Einwirkung größerer Lösungsmengen (z.B. Wassereinbruch) auf das Gebirge zu übertragen und Lasten aus dem Gebirge aufzunehmen.

Im Folgenden werden an ausgewählten Beispielen unterschiedliche Baukonzepte für Streckenverschlüsse im Wirtsgestein Salz veranschaulicht. Das Design der geplanten oder bereits erbauten Abdichtungsbauwerke ergibt sich aus den standortspezifischen Gegebenheiten (z.B. Geologie, Teufe und Geometrie des Hohlraums), Erfahrungswerten und der Entwicklung von Wissenschaft und Technik.

Streckenverschluss Leopoldshall (N.N. 1902)

Das Streckenverschlussbauwerk in der Grube Leopoldshall (Region Staßfurt) zählt zu den ältesten in der Literatur beschriebenen Dammbauwerken und stellt eine Kombination aus Parallel- und Ppropfendamm dar (Abb. 2). Während der Propfendamm die Funktion des Widerlagers erfüllt, besitzt auch der Paralleldamm neben der Dichtwirkung (mittels Länge und Materialien) durch seine propfenartigen Verzahnungen Eigenschaften eines Widerlagers.

Der Bau des auf der 300-m-Sohle befindlichen Damms wurde 1898 begonnen, um die Grube gegen zunehmende Wasserzuflüsse abzudichten. Das Dammbauwerk ist eine Erweiterung eines älteren Damms aus Ziegelsteinen und Portlandzementmörtel (Abb. 2 Zementmauerwerk). Der neue Damm wurde aus mit $MgCl_2$ -gesättigter Lösung getränkten Ziegelsteinen und Magnesiazementmörtel (Magnesiamauerwerk) hergestellt. Da festgestellt wurde, dass Magnesiazement im Kontakt mit Portlandzement nur unvollkommen abbindet, wurde bei der Erweiterung des Damms nach Osten auf 2,70 m und Westen auf 13 m zunächst Portlandzement verwendet, bevor sich das Magnesiamauerwerk anschließt. An der Seite des Lösungszuflusses wurde ein 1 m starker Holzdamm aus Kiefernholz gesetzt, bevor sich ein weiterer Meter Magnesiazementmauerwerk anschließt. An den Wechseln zwischen dem Magnesiazement- und dem Portlandzementmauerwerk bzw. dem Holzdamm wurde Asphalt im zähflüssigen Zustand eingebracht. Der

161,50 m lange Streckenverschluss war während der Betriebsphase des Bergwerks (ca. 20 Jahre) dicht.

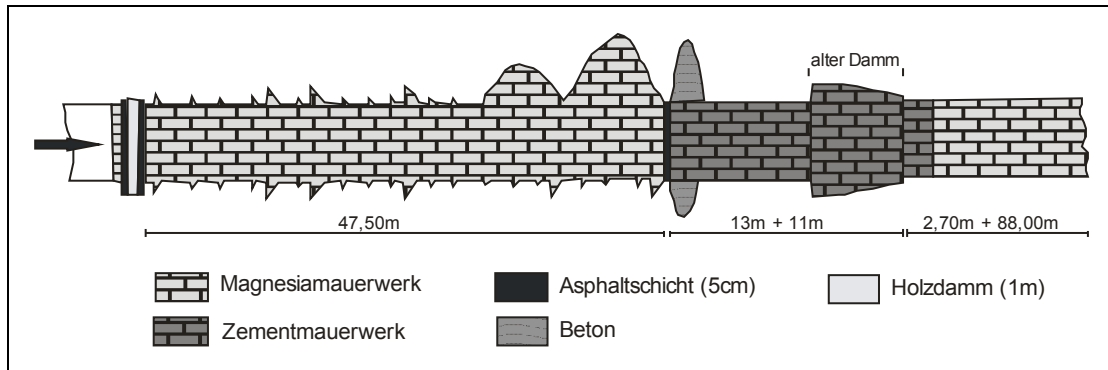


Abb. 2: Längsschnitt des Dammbauwerkes im Bergwerk Leopoldshall (nach N.N. 1902).

Streckenverschluss Sachsen-Weimar (LOHMANN 1930)

Der Streckenverschluss der Grube Sachsen-Weimar (Region Unterbreizbach, Thüringen) wurde 1927 zur Abdämmung einer angefahrenen lösungsführenden Kluft in der 715-m-Sohle errichtet. Der Abdichtungsdamm ist eine Kombination aus Parallel- und Pfropfendamm (Abb. 3). Die Ton- und Betonbereiche dienen als Dichtelement, die Mauerwerk- und Bohlenbereiche als Widerlager. Der Bereich zur Kluft wurde zur Festigung des Gebirges mit Ton verpresst. Das Dammbauwerk beginnt mit einem Mauerwerk und breiten Holzbrettern, gefolgt von einer ca. 3 m starken Stampfbetonschicht, welche sich aus Thuringiazement⁴, Basaltschotter und Sand zusammensetzt. Der Abschnitt des Paralleldammes endet mit einem 1,50 m starken Mauerwerk aus Backsteinen, woran sich der ca. 15 m lange Mehrfach-Pfropfendamm aus Klinkermauerwerk und einer ca. 0,50 m breiten Zementfuge anschließt. Während der Bauarbeiten wurden vier Rohre durch das Bauwerk geführt. Die Rohre wurden einerseits dazu genutzt, die durch die Kluft zulaufenden Lösungen zur Herstellung des Mörtels zu verwenden, andererseits wurden durch sie als Gel ausfallende gelöste Chemikalien, z.B. säure- und tonerdehaltige Salzlösungen, zur Verfestigung und Abdichtung in das Bauwerk und erweitert auch in die Kontaktzone eingepresst.

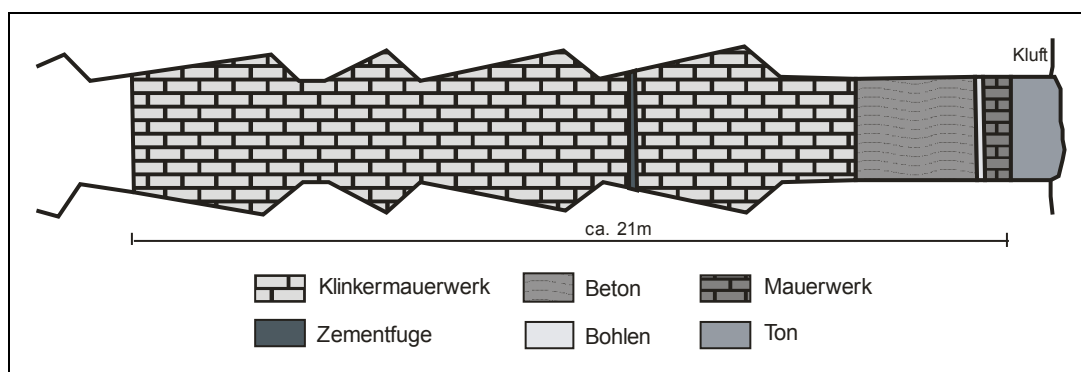


Abb. 3: Längsschnitt des Dammbauwerkes im Bergwerk Sachsen-Weimar (nach LOHMANN 1930).

⁴ Der Zusammensetzung nach kann dieser Zement als hüttensandreicher Hochofenzement bezeichnet werden, dessen Hauptbestandteile Hüttensand und Portlandzement als auch ein kalkhydratabspaltendes Bindemittel sind (EHRENBERG 2010).

Streckenverschluss Hope (FISCHLE & SCHWIEGER 1987)

Das Streckenverschlussbauwerk im Bergwerk Hope (Lindwedel, Niedersachsen) wurde 1983 für die geplante Flutung der Schachanlage auf der 500-m-Sohle entworfen und anschließend errichtet. Es weist eine teilweise funktionale Trennung zwischen Widerlager (Pfropfenform) und Dichtelement (Bitumen und Asphalt als Außen- und Innendichtung) auf (Abb. 4). Gleichzeitig wurden zur Überprüfung der Funktionstüchtigkeit Messungen und begleitende Berechnungen durchgeführt. Für die Auslegung des Pfropfendamms wurde ein hydrostatischer Druck von 6 MPa zugrunde gelegt. Das Bauwerk besteht aus zwei Stützteilen aus Salzbeton von je 5 m und einer 0,50 m starken Innendichtung aus Sandasphalt. Der Lasteintrag der Flüssigkeitssäule drückt das erste Stützteil gegen die Innendichtung und an das Gebirge, wodurch sich die Auflockerungs- und Porenbereiche verschließen. Zur Verhinderung von Umläufigkeiten wurde die Innendichtung in das Gebirge eingebunden. Berechnungen hinsichtlich Zugspannungsentwicklungen zeigten eine hohe Belastung in den lösungsseitigen Randbereichen des Bauwerks. Um die statischen Verhältnisse zu verbessern, wurde eine Oberflächendichtung von 0,30 m auf der Seite an dem die Lösung erwartet wird in das Gebirge eingebracht. Fünf Wechsellagen von Bitumen und Edelstahlblech bewirken einen Schutz der Betonteile gegen Auslaugung und chemische Alteration. Bis zum Ausfall der Messsysteme konnte ein Standhalten des Damms bis zu einem Druck von 0,75 MPa festgestellt werden.

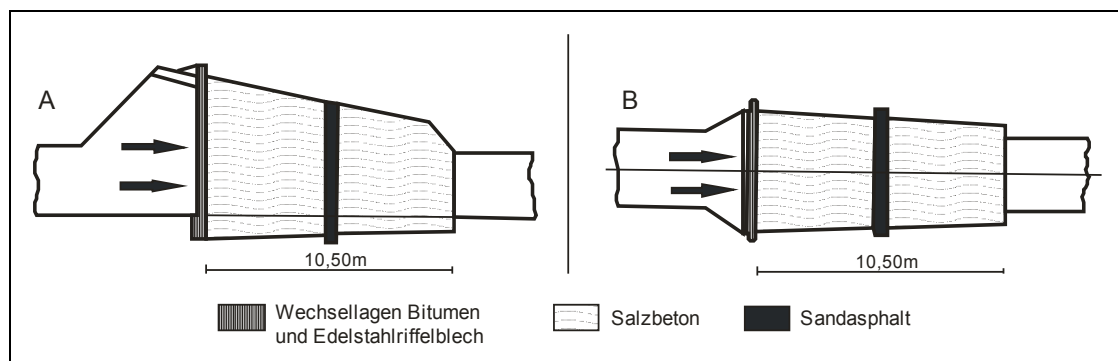


Abb. 4: Längsschnitt (A) und Draufsicht (B) des Dammbauwerks im Bergwerk Hope (nach FISCHLE & SCHWIEGER 1987).

Streckenverschluss Immenrode (ALAND ET AL. 1999)

Der Streckenverschluss Immenrode wurde 1996 zur Abtrennung der Grubenfelder Sondershausen und Ludwigshall/Immenrode entworfen. Das Konzept beinhaltet ein langzeitfunktionstüchtiges und beidseitig belastbares Abdichtungsbauwerk auf der Verbindungsstrecke zwischen Sondershausen und Immenrode (Abb. 5). Das Dammbauwerk wurde daher beidseitig symmetrisch gebaut und enthält auf jeder Seite je einen Kurzzeitverschluss (sofort wirksam) und einen Langzeitverschluss. Der Kurzzeitverschluss besteht aus einem mehrfach-pfropfenförmigen Widerlager aus Beton, der mit einem Bitumenanstrich des Gebirges gleitfähig ausgebildet worden ist, und einem Ton-Bentonit-Dichtelement. Der lösungsseitig vorgeschaltete Betonblockdamm ist mit dem Gebirge kraftschlüssig verbunden und dient zur Begrenzung von Volumenvergrößerungen der Bentonit-quellverformung. Da eine Korrosion der Kurzzeitverschlüsse infolge eines Korrosionsangriffs durch das Auftreten von salzhaltiger Lösung zu erwarten war, wurde ein insgesamt ca. 27 m langer Langzeitdichtungsverschluss in Form eines Paralleldammes zwischen den beiden Kurzzeitverschlüssen angelegt. Der Übergang von Kurzzeitdichtung zur Langzeitdichtung wurde mit einem 1,50 m langen Bereich von Lockersedimenten abnehmender Korngröße (Kies-Mittelsand-Feinsand) versehen. Die Langzeitdichtung besteht aus Bentonitformsteinen (Ca-Bentonit)

unterschiedlicher Sandzuschlagsverhältnisse (Langzeitaußenelement: 70% Quarzsandzuschlag, Kerndichtung: 50% Quarzsandzuschlag). Die Abdichtung der Kontaktzone soll während des Funktionszeitraumes der Kurzzeitdichtung durch die Gebirgskonvergenz gewährleistet werden. Das Dammbauwerk wurde bisher noch keinem Lösungsdruck und damit keiner Kurz- oder Langzeitbelastung ausgesetzt.

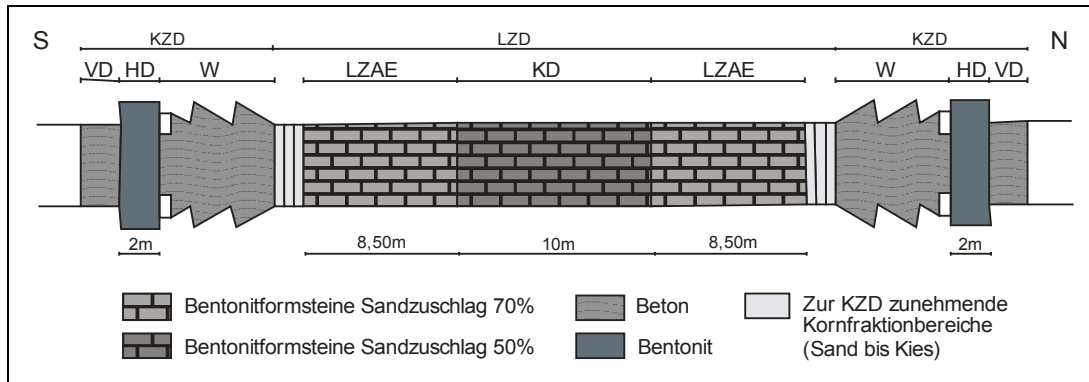


Abb. 5: Dammbauwerk im Bergwerk Ludwigshall/Immenrode–Schacht Immenrode (nach ALAND ET AL. 1999)
KZD=Kurzzeitdichtung, LZD=Langzeitdichtung
VD=Vordamm, HD=Hauptdamm, W=Widerlager, LZAE=Langzeitaußenelement, KD=Kerndichtung.

Streckenverschluss Sondershausen (SITZ 2003)

Das Streckenverschlussbauwerk Sondershausen (Thüringen) wurde im Zeitraum 1997 bis 2003 zu Versuchszwecken als Verschlussbauwerk zum Nachweis der Realisierbarkeit und Funktionsfähigkeit eines langzeitstabilen und bis zu einem Druck von 8 MPa flüssigkeitsdichten Streckenverschlusses gebaut und getestet (Abb. 6). Das Konzept basiert auf einer Funktionstrennung des ca. 11 m langen Verschlusses von Dichtelement (Paralleldamm) und statischem Widerlager (Pfropfendamm). An der Seite, an der Lösung erwartet wird, beginnt der Aufbau des Dammbauwerkes mit einer Druckkammer bestehend aus Lockersedimenten (Sandkorngröße) und Filtersteinen. Daran schließt sich das erste Dichtelement aus Ca-Bentonitformsteinen an. Es folgt eine zweite Druckkammer und das zweite Dichtelement, bestehend aus Bentonitformsteinen und einer eingeschalteten Lage aus Gussasphaltsteinen. Den Abschluss bildet ein pfropfenförmiges Widerlager aus Salzbriketts, die aus Salzgrus gepresst wurden.

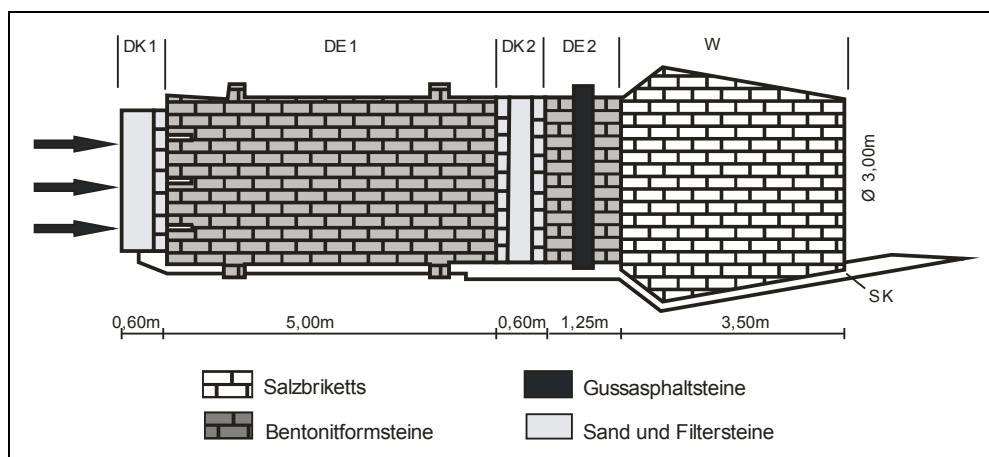


Abb. 6: Längsschnitt des Dammbauwerks im Bergwerk Sondershausen (nach SITZ 2003)
DE=Dichtelement, DK=Druckkammer, W=Widerlager, SK=Sohlekanal.

Die Ergebnisse der Funktionstüchtigkeitsprüfung zeigten bei einer Fluidruckbelastung ab 4 MPa erhöhte Verschiebungen des Widerlagers, die bei 8 MPa zu einem Herausgleiten eines Blockes aus dem Widerlagerverband und damit zu einem Versagen führte. Durch das druckseitige Quellen des Bentonits und das Nachrücken des Dichtelements konnte dieses seine prinzipielle Funktion erfüllen, allerdings traten ab 1,5 MPa besonders im Bereich der Kontaktzone Sohle (Sohlekanal) zunehmend Umläufigkeiten auf, die nach Meinung von Sitz (2003) möglicherweise auf die sich dort befindlichen Messkabel zurückzuführen sind.

Streckenverschluss Teutschenthal (KNOLL 2005)

Im Rahmen des Forschungsvorhabens CARLA wurde ein Baukonzept für einen Streckenverschluss in leichtlöslichen Salzgesteinen (Carnallit) entworfen (Abb. 7). Die benötigten Referenzparameter stammen aus dem Anwendungsfall der Grube Teutschenthal. Die dortigen geologisch-mineralogischen Verhältnisse zeichnen sich durch tachyhydritreichen Carnallit und Kieserit als Hauptbestandteile des Salzgesteins aus. Das Baukonzept wird auch für andere Standorte mit carnallitischen Salzgestein als übertragbar angesehen. Bei dem entworfenen Streckenverschluss handelt es sich um einen Paralleldamm, bei dem die Widerlager (MgO-Beton) gleichzeitig auch eine Dichtwirkung einnehmen. Das Dammbauwerk beginnt mit einem Vorbauelement, bestehend aus einer Vorschüttung spezieller Salzgemische und einem Bereich aus Gelbaustoffen mit Tachyhydritdepot⁵, das zur Absicherung einer gesättigten bauwerksverträglichen Lösung dient. Das sich anschließende Hauptelement 1 beginnt mit einem permeablen MgO-Vordamm (Sorelbeton bzw. Magnesiabinder), gefolgt von einer Bitumen/Asphalt-Dichtung. Auf den folgenden 80 m der beiden Hauptelemente wird steifer MgO-Beton verwendet. Umlaufende Dichtungsschlitze aus Injektionsbitumen dienen zur Unterbrechung des Strömungsweges über die Auflockerungszone und die Kontaktzone. Ein 1 m breiter Bereich aus Gussasphalt dient als zusätzliches Dichtelement zwischen den beiden Hauptelementen. Obwohl das Damm- bzw. Abdichtbauwerk für eine einseitige Krafteinwirkungsseite entworfen ist, kann es bei beidseitigem Lösungsangriff symmetrisch gestaltet werden.

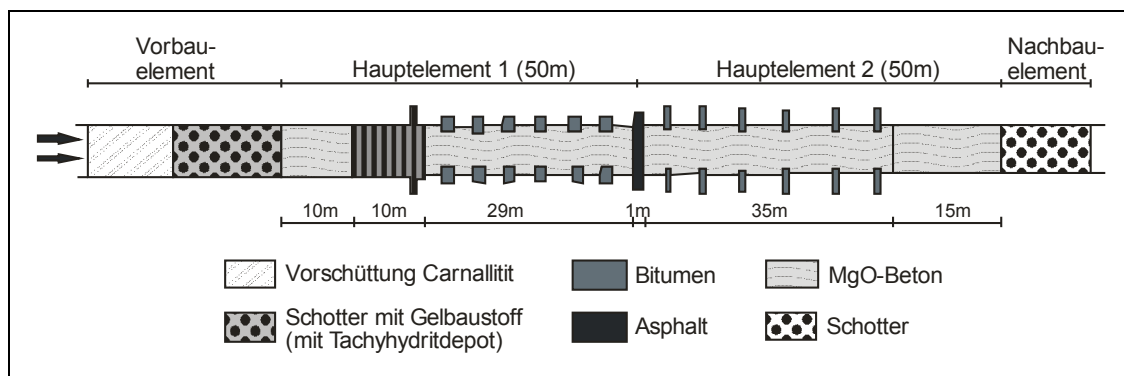


Abb. 7: Entwurf eines Streckenverschlusses für das Bergwerk Teutschenthal (nach KNOLL 2005).

⁵ Trachyhydrit ($\text{CaMg}_2\text{Cl}_6 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) ist ein wasserhaltiges Kalzium-Magnesium-Chlorid. Es ist sehr gut wasserlöslich und besitzt die Eigenschaft, der Umgebungsluft die Feuchtigkeit zu entnehmen und dann rasch zu zerfließen.

4.1.2 Konzepte für Streckenverschlussbauwerke in Endlagern für radioaktive Abfälle in Salzgesteinen

Aus den Erfahrungen mit Dammbauwerken aus dem Salzbergbau und den Erkenntnissen aus Forschung und Technik entwickelten sich die nachfolgenden Konzepte für Streckenverschlüsse in Endlagern für radioaktive Abfälle. Während bei den Dammbauwerken im Bergbau die Dichtigkeit gegen eindringende Lösungen im Vordergrund steht, um ein Absaufen der Grube zu verhindern, muss bei einem Verschlussbauwerk in einem Endlager für radioaktive Abfälle auch zusätzlich das Austreten möglicher kontaminierter Fluide (Lösungen und Gase) berücksichtigt werden, um ein Eindringen in die Biosphäre und damit eine Gefahr für Leib und Leben der Menschen sowie der Fauna und Flora zu verhindern. Die Auslegung solcher Streckenverschlussbauwerke steht im Zusammenhang mit der ingenieurtechnischen Umsetzbarkeit, der einzulagernden Abfallart (LLW, ILW und HLW), der geologische Situation und den vorgegebenen Schutzziele unter Berücksichtigung des Mehrbarrierenkonzepts.

Im Rahmen des FuE-Vorhabens „Dammbau im Salzgebirge“ stellte FISCHER (1990) eine Konzeption eines Endlager-Dammbauwerks vor (Abb. 8). Das Konzept verfolgt eine beidseitige Wirksamkeit gegen auftretende Fluide und beruht auf einer Funktionstrennung von Dichtigkeit und Tragfähigkeit. Der Streckenverschluss besteht aus drei Hauptkomponenten: einer sofort wirksamen Kurzzeitdichtung (hydraulisches Dichtungssystem), einer Langzeitdichtung und einem mehrfach-pfropfenförmigen Widerlager. Das sich in der Mitte des symmetrisch aufgebauten Dammbauwerks befindliche Widerlager besteht aus Salzbeton und hat die Funktion, den Gebirgsdruck aufzunehmen bzw. mögliche auf das Bauwerk wirkende Fluiddrücke ins Gebirge abzuleiten. Eine sich anschließende Langzeitdichtung aus Salzbricketts soll im Laufe der Zeit ihre Wirkung infolge der Komprimierung durch die Konvergenz entfalten. Direkt an die Langzeitdichtung grenzt eine Gussasphaltdichtung, die nach außen durch eine Stützmauer aus Salzbetonformsteinen fixiert wird. Ihr ist die Aufgabe zugeordnet, eine Durchdringung der vorgelagerten Sandasphaltdichtung abzuwehren. Die Sandasphaltdichtung dient zur Verhinderung des Kontaktes von Bitumen mit der Langzeitdichtung bei einem möglichen Auslaufen des Bitumens aus der Bitumenkammer. Die Bitumenkammer ist das Hauptdichtelement des hydraulischen Dichtsystems. Beidseitig zur Bitumenkammer befinden sich breite Stützmauerbereiche aus Salzbeton und Salzbetonformsteinen, die den Bitumendruck aufnehmen und an die nachgeschalteten Komponenten übertragen sollen. An die Stützmauer schließt sich nach außen eine weitere Sandasphaltdichtung an, worauf wieder Stützmauern aus Salzbetonformsteinen mit einer zwischengelagerten Gussasphaltdichtung folgen. Das Dammbauwerk schließt nach außen mit einem Vordamm aus Salzbeton ab, der die Aufgabe hat, „das Bitumen in der Bitumenkammer am Platze zu halten“ (FISCHER 1990, S.55). Der Vordamm soll durch eine vorgeschaltete Stirndichtung aus Gussasphalt und einer Stützmauer vor korrosiv angreifender Lösung geschützt werden.

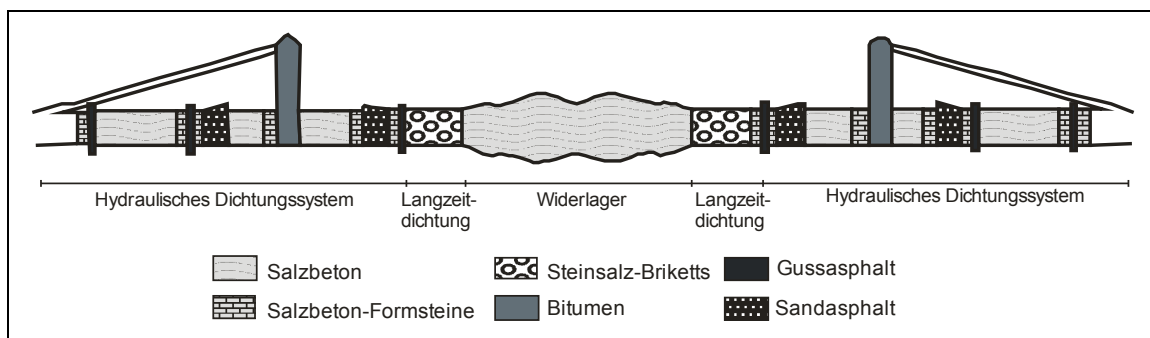


Abb. 8: Konzept eines beidseitig wirkenden Streckenverschlusses für ein Endlager (nach FISCHER 1990).

Konzept des Versuchsdammbauwerks in der Schachtanlage Asse II

Nachdem die Schachtanlage Asse II von 1909 bis 1964 zum Abbau von Kali- und Steinsalz genutzt wurde, ging sie 1965 an den Bund über und diente lange Zeit der Erforschung endlagerbedingter Fragestellungen. Derzeitig finden Planungen statt, die in der Zeit von 1967-1978 eingebrachten schwach- und mittlerradioaktiven Abfälle (mehr als 125.000 Fässer und Gebinde) zu bergen.

Im Zusammenhang mit dem in Abb. 8 gezeigten Streckenverschlusskonzept für ein Endlager wurde der Konstruktionsentwurf eines Versuchsdammbauwerks vorgestellt, das Aussagen zur Funktionsfähigkeit und zur technischen Realisierbarkeit bei einer einseitigen Belastung liefern sollte (FISCHER 1990). Das 1990 ursprünglich präsentierte Versuchsdammbauwerk ist in Abb. 9 dargestellt. Die Funktion der Komponenten und die Materialien entsprechen dem des bereits vorgestellten Dammbauwerkkonzepts für ein Endlager (siehe oben). Aus späteren Berichten (z.B. MÜLLER-HOEPPE 2010) geht hervor, dass das Versuchsbauwerk nur teilweise gebaut werden sollte (Abschnitte der Druckkammer bis zur Bitumenkammer). Welche Ausmaße das Bauwerk letztendlich bekommen hätte, ist ungewiss, denn 1992 wurde die Versuchstätigkeit der Großprojekte im Grubengebäude der Asse und damit auch das Dammbauvorhaben aus politischen Gründen eingestellt. Das Bauwerk konnte weder in der ursprünglichen noch in der „eingeschränkten Form“ fertiggestellt werden.

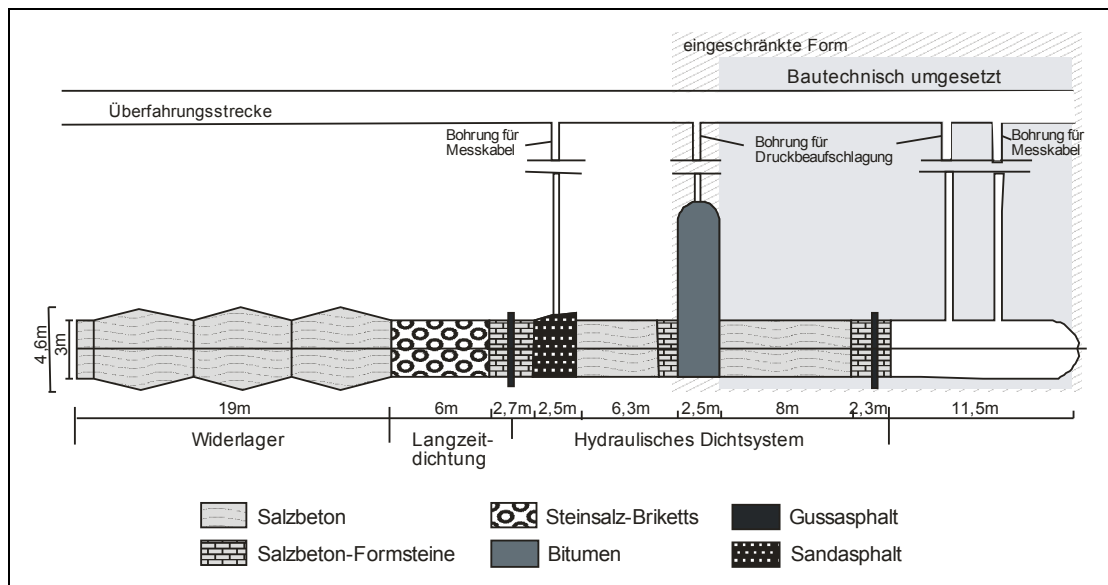


Abb. 9: Längsschnitt des geplanten und teilweise erbauten Versuchsdamms Asse II (nach FISCHER 1990 / MÜLLER-HOEPPE 2010).

Die bis 1992 bautechnische Umsetzung auf der 950-m-Sohle (-751 m NN) in der „Dammstrecke Nord“ umfasst eine Druckkammer, zwei Stützmauern, ein Dichtungselement und den Vordamm (MÜLLER-HOEPPE 2010). In der Druckkammer sollte der Testdruck aufgebracht werden. Dieses 11,50 m lange Element ist mit Basaltschotter gefüllt, um eine gleichmäßige Beaufschlagung an der Frontseite des Damms zu erreichen (FISCHER 1990). Das Versuchsbauwerk beginnt mit einer 0,8 m langen Stützmauer aus Salzbetonformsteinen. Darauf folgt eine 0,3 m lange Stirndichtung aus Gussasphalt, die 0,5 m umlaufend in das Gebirge eingebunden ist. Hinter der Stirndichtung befindet sich eine weitere Stützmauer aus Salzbetonformsteinen, von diesmal 1,20 m Länge. Als letzte Bauwerkskomponente konnte der 8 m lange Vordamm aus Salzbeton (Hochofenzement, NaCl-Lösung, Steinsalz) fertiggestellt werden. Er wurde in zwei Bauabschnitten mit bis zu vier Betonierabschnitten erstellt, wobei die potenziell verbliebenen Hohlräume an der Firste handverstopft und über Injektionsschläuche mit Zementsuspension nachinjiziert wurden (MÜLLER-HOEPPE 2010). Der Vordamm enthält zwar mehrere Messstellen für Gasdruck- und Leitfähigkeits-

messungen, die geplante Druckbeaufschlagung mit Gas und Flüssigkeit wurde jedoch nicht vorgenommen (MÜLLER-HOEPPE 2010). Der Versuchsdamm ist heute nicht mehr zugänglich.

Der Versuchsdamm diente als Vorlage für die Strömungsbarrieren im Grubengebäude der Asse II. Strömungsbarrieren haben die Aufgabe, Lösungsbewegungen im Grubengebäude zu begrenzen bzw. zu lenken, damit stabile Strömungs- und Transportverhältnisse erzeugt werden (BFS 2009). Obwohl eine Strömungsbarriere kein Streckenverschlussbauwerk ist und auch nicht als solches konzipiert wurde, wird sie an dieser Stelle dennoch erwähnt, da die Ergebnisse der in der Asse zu Versuchszwecken errichteten Pilotströmungsbarrieren die Grundlagen zur Weiterentwicklung von Magnesiabindern für den Einsatz in Verschlusselementen bilden (siehe KRAUKE ET AL. 2007 / WEISE & SALZER 2008 / SCHANZ ET AL. 2008). Die erste Pilotströmungsbarriere wurde im Mai/Juni 2003 auf der 775-m-Sohle errichtet (MEYER ET AL. 2008). Diese setzt sich aus einer 30 m langen Kernbarriere zwischen zwei 5 m langen begrenzenden Widerlagern zusammen und ist mit einer einseitigen Druckkammer versehen (MEYER ET AL. 2008). Der Baustoff der Kernbarriere und der Widerlager ist Sorelbeton (Typ 29.6 A2). Durch den Bau dieser Pilotströmungsbarriere diente zum Nachweis zur bautechnischen Machbarkeit mit dem Baustoff Sorelbeton im Maßstab 1:1. Weiterhin wurde die Durchströmung des Baukörper und der sich anschließenden Auflockerungszone mit $MgCl_2$ -Lösung experimentell geprüft, um Aussagen zur Permeabilität treffen und thermische und hydraulisch-mechanische Modellrechnungen zur Funktionalität kalibrieren bzw. verifizieren zu können. Es wurden Konvergenz-, Temperatur- (Abbindewärme) und Druckmessungen durchgeführt. Für die Druckmessungen unterlag das Bauwerk Druckhalte-, Drucksteigerungs- und Ruhephasen. Im gesamten Zeitraum der Fluid-Druckbeaufschlagung (2004 bis 2008) – einschließlich der Drucksteigerungs- und Ruhephasen – wurden in der Druckkammer insgesamt $59,0 \text{ m}^3$ $MgCl_2$ -Lösung eingepresst und $20,3 \text{ m}^3$ luftseitig aufgefangen. Zu Vergleichszwecken mit einer Baustoffvariation (Sorelbeton A1) wurde 2006 eine zweite Pilotströmungsbarriere auf der 950-m-Sohle errichtet. Die daraus hervorgegangenen Ergebnisse zeigten eine diesbezüglich geeignetere Anwendung des Baustoffs A1 unter den spezifischen Bedingungen im Grubengebäude der Asse II.

Konzept eines Streckenverschlussbauwerks für das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben – ERAM (MAUKE & LASKE 2007 / KRAUKE & FLIß 2008 / RESELE ET AL. 2009)

Im ehemaligen Kali- und Steinsalzwerk Marie/Bartensleben (Landkreis Börde, Sachsen-Anhalt) wurden in der Grube Bartensleben von 1971 bis 1991 und von 1994 bis 1998 schwach- und mittelradioaktive Abfälle eingelagert. Derzeitig befindet sich der Antrag zur Stilllegung des Endlagers im Prozess des Planfeststellungsverfahrens. In den eingereichten Planungen werden zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit (Schutz vor Freisetzung radio- und chemotoxischer Stoffe) als auch der Sicherheit vor unzulässigen Senkungen der Geländeoberfläche eine Zusammenführung der Konzepte der Vollverfüllung und der Abdichtung verfolgt. Unter anderem sind ca. 22 Streckenverschlussbauwerke mit der Auslegung gegen einen Lösungsdruck von 6 MPa und einer Länge von 26 bis 200 m geplant (POLSTER 2010). In den Planfeststellungsunterlagen sind zwei verschiedene Bauvarianten als Streckenverschlüsse vorgesehen. Die meisten Abdichtungsbauwerke werden aus einer Aneinanderreihung von einzelnen Segmenten (Abb. 10 B) aus Salzbeton (Zement, Steinkohlenflugasche, Salzgrus-Zuschlag und Wasser) bestehen. Die Segmente sind 15-30 m lang und durch plastische Dehnfugen aus Salzbriketts (alternativ Salzgrus) voneinander getrennt. Der Salzbeton wird über das firsthöchste Verfüllrohr in die Schalung geleitet und umfließt dabei die zur Verhinderung von horizontal gerichteten Spannungsrissen (infolge thermischer Kontraktion und Schwinden) eingebauten Folien oder Bleche. Ein firstbündiger Abschluss wird durch einen Vorschnitt der Streckenfirste von $1,8^\circ$ erreicht. Die Verfüllleitungen werden anschließend aus dem noch nicht verhärteten Beton gezogen. Im letzten Segment des

Streckenverschlussbauwerks (dem am weitesten vom Einlagerungsort entfernten Segment) werden nach Abklingen des Schwindens und der thermischen Kontraktion Injektionen aus Feinstbindemittel (Zementsuspension) in die Kontaktzone Bauwerk/Gebirge verpresst, um dort eine ausreichende Dichtigkeit zu erreichen. Die dafür genutzten Injektionsschläuche als auch die Schalung des ersten zum Einlagerungsbereich gerichteten Segments verbleiben im Grubenbau. Um die technische Machbarkeit zu belegen und eine Funktionalitätsprüfung durchzuführen, wurde 2010 ein Streckenverschluss-Versuchsbauwerk aus Salzbeton⁶ (H 4-5m, B 4,5m, L 25m) errichtet. Das Bauwerk ist seit 2012 einer Druckbeaufschlagung mit NaCl-Lösung ausgesetzt (0,3 MPa, seit 2013 0,7 MPa). Der in-situ-Versuch soll neben der Injektionsfähigkeit der Kontaktzone und der Verbindung zwischen Beton und Salzgestein u.a. auch Ergebnisse über die Abbinde-temperatur, Spannungsverteilung, Porosität, Permeabilität und hydraulisch induzierte Rissbildung liefern (MAUKE & HERBERT 2013). Eine detaillierte Beschreibung über den Aufbau und das Messprogramm findet sich in MAUKE & MOHLFELD (2010) und MAUKE ET AL. (2012). Die derzeitig vorliegenden Ergebnisse werden z.B. in MAUKE (2011), MAUKE (2013) und MAUKE & HERBERT (2013) beschrieben. Unter anderem konnten bisher der Nachweis der technischen Herstellbarkeit erbracht, eine im Vergleich zur Handverstopfung (Anwendung Asse Versuchsdamm) bessere Kontaktzonen-Verdichtung durch Ringinjektionsleitungen erzielt und die geforderte integrale Permeabilität belegt werden. Allerdings wurde auch festgestellt, dass die Eigenschaften des in-situ Versuchsbauwerks durch die Messausrüstung und die Messungen selbst beeinflusst werden können. Der Zielwert für die bestimmenden Parameter lag häufig im Bereich der Nachweisgrenze der verwendeten Messsysteme. Zudem traten unerwartete Ergebnisse auf, wie z.B. lokale Rissbildungen. Diese erfordern weiteren Untersuchungsbedarf, der in diesem Fall die Kenntnis über zu erwartende Ausmaße der Risse, deren hydraulische Relevanz und deren Einfluss auf das Korrosionsverhalten betrifft. Die Tests halten an.

Die geologische Situation (geklüfteter Anhydrit) bedingt im Ostbereich auf der 4. Sohle (-372 m) eine andere Bauweise des dort geplanten ca. 150 m langen Streckenverschlusses. Das Design sieht vier Abdichtungselemente und fünf Widerlager aus Sorelbeton (MgO-Beton bzw. Magnesia-binder) sowie zwei Vordichtelemente aus zementgebundenen Konstruktionsmörtel vor (Abb. 10 A). Durch den Einsatz dieser beiden unterschiedlichen Baustoffe soll eine hohe geochemische Stabilität gegenüber zutretenden Lösungen unterschiedlicher Zusammensetzung gewährleistet werden. Der Konstruktionsmörtel, bestehend aus Hochofenzement, Elektrofilterasche und Kalksteinbrechsand wird als korrosionsstabil gegenüber NaCl-Lösungen und korrosionsinstabil gegenüber MgCl_2 -Lösungen angesehen. Der Sorelbeton ist dagegen stabil gegen MgCl_2 -Lösungen und instabil gegen NaCl-Lösungen. Aufgrund der Annahme, dass sich langfristig ein MgCl_2 -lösungshaltiger Zutritt einstellt, wird davon ausgegangen, dass eine Langzeitsicherheit des Verschlussbauwerks zu erwarten ist. Es wird erwartet, dass das Quellverhalten des Magnesia-betons eine Überdrückung der Kontaktfuge und den Aufbau einer Druckspannung hervorruft, wodurch eine wirksame Lastabtrags- und Dichtfunktion erreicht werden könnte. Anders als in dahingehenden erfolgreich durchgeführten Laborversuchen konnte ein langanhaltender Quelldruck unter in-situ Bedingungen (Versuchsbauwerk Bleicherode) nicht erreicht werden (BFS 2013). Durch die unterschiedliche Entwicklung des Quelldrucks in Laborversuchen und im Großversuch werden Änderungen für die Handhabung des Materials abgeleitet und ein weiteres modifiziertes in-situ Versuchsbauwerk im ERAM geplant (BFS 2013).

⁶Der dabei verwendete Salzbeton entspricht der Rezeptur M2. Informationen zur Rezeptur und der Modifikation für das Versuchsbauwerk sind aus DBE (2009) und IHU (2011) zu entnehmen.

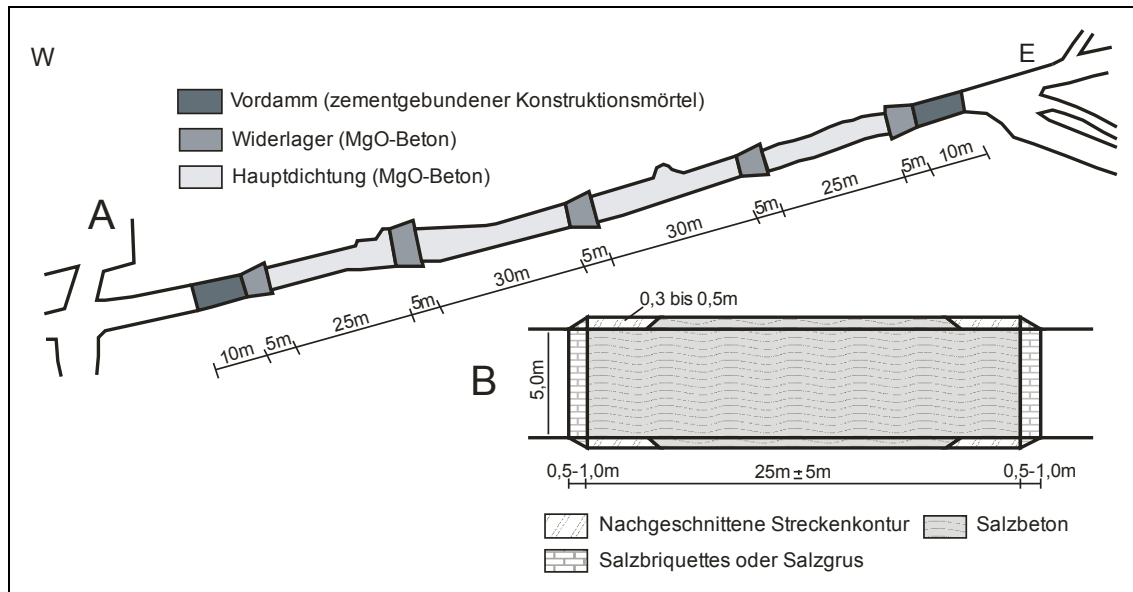


Abb. 10: Streckenverschlussbauwerke für das Endlager Morsleben; (oben) Aufbau Streckenverschluss Ost 4. Sohle (nach KRAUKE & FLIß 2008), (unten) Längsschnitt eines Streckenverschlussesegments (nach POLSTER 2010).

Konzept eines Streckenverschlussbauwerks der Waste Isolation Pilot Plant- Site (DOE 2004)

International wird die Einlagerung von schwach- und mittlerradioaktiven Abfällen im Salzgestein konzeptionell nur in der US-amerikanischen WIPP (Waste Isolation Pilot Plant) verfolgt. Das derzeitige Konzept für horizontale geotechnische Barrieren beinhaltet den Verschluss des Einlagerungsbereiches (panel closures) und verzichtet auf ein zusätzliches Streckenverschlussbauwerk wie noch von VAN SAMBEEK ET AL. (1993) vorgestellt. Für den Verschluss des Einlagerungsbereiches wurden vier verschiedene Verschlussdesigns, abhängig von der Untergrundsituation und vom Potential einer möglichen Gasentwicklung (Methan), betrachtet (WIPP 2009). Ausgewählt wurde Option D (Abb. 11). Das Verschlussbauwerk besteht aus zwei geotechnischen Systemkomponenten: einer monolithischen Betonbarriere und einer Explosions-Isolationsmauer, deren Designs funktionelle Anforderungen der Lasteinwirkung des Gebirges (Salzkriechen), den Innendruck und eine postulierte Methanexplosion berücksichtigen. Die 3,65 m starke abfallseitige Explosions-Isolationsmauer besteht aus soliden mit Mörtel zusammengefügteten Betonblöcken und soll dynamische Belastungen aus einer Deflagration und den Belastungen des Salzkriechens standhalten, damit eine ausreichende Festigkeit gegenüber Druck- und Schubspannungen und eine hinreichende Funktionstauglichkeit besonders während der Betriebsphase gewährleistet wird. Die beidseitig konisch geformte monolithische Betonbarriere baut die Kompressions- und Scherspannung aus dem Gebirge ab bzw. leitet diese in das Gebirge über. Als Beton wird Salado Mass Concrete (SMC) verwendet. Dieser Salzbeton setzt sich aus Portlandzement, Flugasche, Steinsalz, schrumpf- bzw. schwindungsarmem Zement als auch aus fein- und grobkörnigen Aggregaten zusammen (WAKELEY ET AL. 1995). Eingbracht wird der Beton durch Ø 15 cm Stahlrohre und durch ein von außerhalb der Schalung durchgeführtes Rütteln verdichtet. Um eine horizontale Rissbildung und somit mögliche Fließwege zu unterbinden, werden Stahlplatten und versetzte Abstandsstäbe in die Betonbarriere eingebracht, die die Lastreaktionen aufnehmen. Durch Injektionen wird die Kontur zum Gebirge versiegelt. Vor dem Einbau beider geotechnischer Komponenten wird ein Nachschnitt der Streckenkontur vorgenommen.

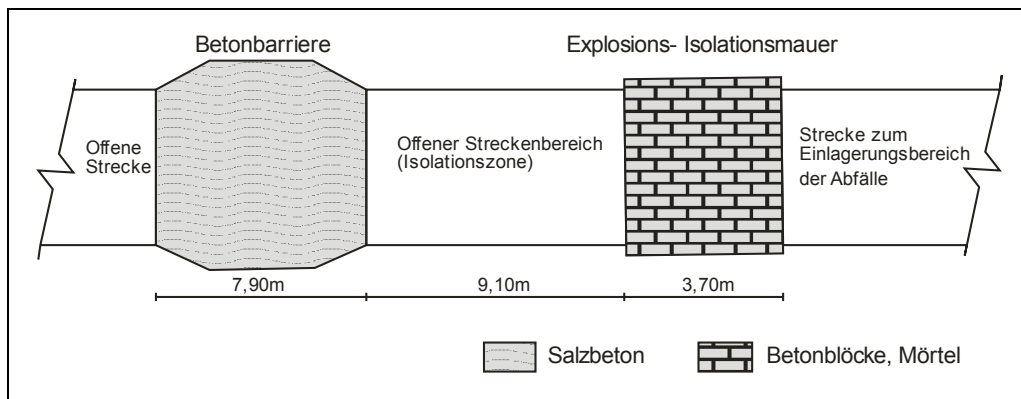


Abb. 11: Längsschnitt eines horizontalen Verschlussbauwerks des Einlagerungsbereiches für die WIPP (nach DOE 2004 / CAMPHOUSE 2012).

Konzept eines Streckenverschlusses für ein mögliches HLW-Endlager am Beispiel des Standortes Gorleben (MÜLLER-HOEPPE 2012A)

Im Rahmen des vom Bundesministerium geförderten Projektes VSG (Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben) wurde im Zusammenhang mit der Eignungsprüfung des Standortes Gorleben für ein mögliches HLW-Endlager eine Zusammenfassung des bisherigen Kenntnisstandes einschließlich der Erarbeitung des zukünftigen Forschungs- und Erkundungsbedarf und die Weiterentwicklung von Endlagerkonzepten durchgeführt.

Der Konzeptentwurf des geotechnischen Verschlusssystems (Schachtverschluss, Streckenverschluss) basiert auf der Zielstellung einen Zutritt von Tages-, Deckgebirgs- und Formationswässern in den Einlagerungsbereich zu vermeiden als auch einen Austritt kontaminierter Lösungen aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich zu beschränken, um einen „Sicheren Einschluss“ zu gewährleisten. In dem Konzept gelten die Streckenverschlüsse gegenüber dem Schachtverschluss als technisch sekundäre, redundante Verschlüsse. Bei der Auslegung werden dennoch ein Lösungsdruck bis zur Geländeoberfläche und ein einlagerungsseitiger Gasdruck berücksichtigt.

Der Streckenverschluss besteht aus zwei 50 m langen Dichtelementen aus Sorelbeton (MgO-Beton bzw. Magenesiabinder: Magnesiumoxid, Magnesiumchloridlösung und Steinsalz), die zwischen Widerlagern eingebracht werden (Abb. 12). Die Widerlager werden ebenfalls aus Sorelbeton hergestellt und sind zwischen 0,75 m dicken Schalungsmauern aus Mauerziegeln (ggf. Kalksandstein oder Salzbriketts) angeordnet. Nach einem Streckennachschnitt im Bereich der Dichtelemente erfolgt deren Betonage über je zwei Firstbohrungen (je Ø 200 mm Verfüll- und Entlüftungsbohrung), die aus einem vertikal angelegten Hohlraum gestoßen werden. Im mittleren Bereich des Dichtelementes wird deshalb ein firsthöchster Punkt mit einem geplanten Neigungswinkel von 1,5° hergestellt, um Lufteinschlüsse bei der Betonage zu vermeiden. Die Betonage der Widerlager erfolgt nicht über Bohrungen, sondern ausgehend von den firsthöchsten Punkten der jeweiligen Luftseite.

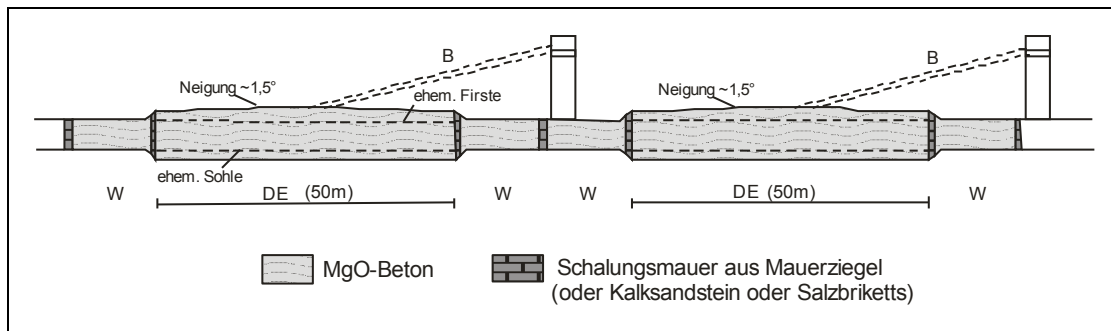


Abb. 12: Konstruktive Gestaltung eines Streckenverschlussbauwerks für ein mögliches HLW-Endlager Gorleben, Längsschnitt (nach MÜLLER-HOEPPE ET AL 2012);
DE=Dichteelement, W=Widerlager, B=Bohrung.

Im Gegensatz zu den bisher umgesetzten Dammbauwerken aus Kapitel 4.1.1 führt die Auslegung von Streckenverschlussbauwerken für Endlager mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen zu neuen Herausforderungen bei deren Konstruktion. Die Umsetzbarkeit der vorgestellten Konzepte ist noch zu prüfen, ebenso wie die Langzeitstabilität der eingesetzten Materialien.

4.2 Anforderungen aus Gesetzestexten, Richtlinien und Empfehlungen

Dieser Teil des Kapitels 4 gibt einen Einblick in die derzeitigen gültigen Gesetzestexte, Rechtsverordnungen, Richtlinien, Empfehlungen und Leitlinien, und zeigt damit, welche bestehenden rechtlichen Vorgaben und welches Expertenwissen bei der Auslegung eines Streckenverschlussbauwerks für ein HLW-Endlager berücksichtigt werden müssen bzw. können. Grundlegend für die Zusammenstellung von auslegungsbestimmenden Anforderungen sind die generell abstrakten, aber rechtlich bindenden Gesetzestexte und ihre zugehörigen Verordnungen. Richtlinien sind neben den Verordnungen die wichtigsten Handlungsformen eines politischen Gemeinwesens. Im Allgemeinen sind sie nicht zwingend anzuwenden und werden erst nach Umsetzung in nationales Recht hinsichtlich des zu erreichenden Ziels verbindlich, sodass der Einzelne durch die Richtlinie berechtigt und verpflichtet werden kann. Im Hinblick auf diese Zielsetzungsverbindlichkeit unterscheiden sich Richtlinien deutlich von den Leitlinien und Empfehlungen. Diese sind grundsätzlich nicht verbindlich. Sie stellen allerdings allgemein anerkannte Vorgehensweisen und Expertenwissen dar und werden besonders für die ingenieurtechnische Bemessung als grundlegende Vorgehensweise herangezogen. Daher sollten sie bei einer Problemstellung in die Überlegungen zur Lösungsfindung einbezogen werden.

4.2.1 Gesetze und Verordnungen

Im GESETZ ZU DEM ÜBEREINKOMMEN ÜBER NUKLEARE ENTSORGUNG (1997) verpflichtet sich Deutschland, den angemessenen Schutz des Einzelnen, der Gesellschaft und der Umwelt vor radiologischer und sonstiger Gefährdung in allen Stufen der Behandlung radioaktiver Abfälle (Endlagerung) sicherzustellen (Art 11). Dabei sind die Kritikalität und die entstehende Restwärme zu berücksichtigen (Art 11 i) sowie geeignete Schutzmethoden anzuwenden (Art 11 iv), die zur Erfüllung der Verpflichtung erforderlich sind.

Grundlage der mit der Entsorgung (hoch)radioaktiver Abfälle im Zusammenhang stehenden Gesetzgebung (GG 2012) in Deutschland ist das in der Verfassung verankerte "Recht [...] auf

Leben und körperliche Unversehrtheit“ (Art 2 GG) und die staatliche Verantwortung für den Schutz der natürlichen Lebensgrundlagen für die künftigen Generationen und für die Tiere (Art 20a GG). Bei der Ablagerung von Stoffen kommt dabei die Forderung nach der Reinhaltung des Grundwassers und somit der Vermeidung einer nachteiligen Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit (§48 WHG 2013) zum Tragen. Des Weiteren „sind erhebliche Beeinträchtigungen von Natur und Landschaft zu vermeiden“ (§13 BNATSchG 2013) und angemessene Schutzmaßnahmen des Bodens, der Luft, der Gewässer, der Flora und Fauna vorzunehmen (BNATSchG 2013).

Nach dem PARISER ÜBEREINKOMMEN (1960, Art 1 A ii) sowie dem ATG (2012 §1, §2 Abs. 5 und Anlage 1 Abs. 1) sind „Anlagen, in denen sich Kernbrennstoffe oder radioaktive Erzeugnisse oder Abfälle befinden“ (PARISER ÜBEREINKOMMEN 1960) bzw. „Anlagen zur endgültigen Beseitigung von Kernmaterialien“ (ATG 2012 Anlage) als Kernanlagen zu betrachten. Die oftmals in Berichten verwendete Einordnung eines Endlagers als kerntechnische Anlage ist gemäß der Definition in § 2 Abs.3a ATG (2012) nicht richtig. Die Genehmigung eines Endlagers für Kernmaterialien unterliegt somit nicht der atomrechtlichen Verfahrensverordnung (AtVfV 2006) sondern verlangt nach § 9b ATG nach einem Planfeststellungsverfahren, welches ein eigenes atomrechtliches Verwaltungsverfahren außerhalb der AtVfV darstellt. In diesem werden Prüfungen zur Umweltverträglichkeit, der kerntechnischen Sicherheit und dem Strahlenschutz gefordert.

Rechtliche Regelungen zur Prüfung der Umweltverträglichkeit verweisen gemäß §3 UVPG bezogen auf Anlage 1 Nr. 11.2 UVPG (UVPG 2013) als auch nach §1 Nr. 7 UVP-V Bergbau (UVP-V BERGBAU 2010) auf ihre Anwendung bei einer Anlage zur Endlagerung radioaktiver Abfälle. Eine Umweltverträglichkeitsprüfung ist ein Verfahren, dass zur Entscheidung über die Zulässigkeit von Anlagen dient und „umfasst die Ermittlung, Beschreibung und Bewertung der unmittelbaren und mittelbaren Auswirkungen eines Vorhabens“ u.a. auf Menschen, Tiere und Pflanzen als auch Boden, Wasser, Luft und Landschaft (§2 Abs. 1 und 2 UVPG 2013). Gefordert wird neben der Beschreibung von zu erwartenden Umweltauswirkungen, deren Vermeidungsmaßnahmen, Lösungsvarianten und technischen Lücken (§6 Abs. 3 und 4 UVPG 2013), auch „die dem Stand der Technik entsprechenden baulichen, betrieblichen oder organisatorischen Maßnahmen zur Vorsorge gegen die Beeinträchtigung der Schutzgüter“ (§21 Abs. 4 UVPG 2013).

Die laut §9b Abs. 5 Nr. 1 ATG (2012) geforderten Nachweise der kerntechnischen Sicherheit und des Strahlenschutzes beziehen sich auf die StrlSchV (STRLSCHV 2012) und AtStrlSV (ATSTRLSV 1990). Es ist eine „Vorsorge dafür zu treffen ist, dass bestimmte Strahlendosen und bestimmte Konzentrationen radioaktiver Stoffe in Luft und Wasser nicht überschritten werden“ (§12 Abs. 1 Nr. 2 ATG 2012). In diesem Zusammenhang stehen die Begrenzungen von Dosiswerten für die Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umgebung nach §49 Abs. 1 und 2 StrlSchV (2012) (max. effektive Dosis 50 mSv) als auch von Aktivitätskonzentrationen oder Aktivitätsmengen nach §47 Abs. 3 StrlSchV (2012) (max. effektive Dosis 0,3 mSv/a).

Gemäß §9b Abs. 5 Nr. 3 ATG (2012) bezieht sich das Planfeststellungsverfahren ausdrücklich nicht auf das Berg- und Tiefspeicherrecht. Daraus folgt, dass es für die Planung, Errichtung und Betrieb von Endlagern neben dem Planfeststellungsverfahren auch der jeweils notwendigen bergrechtlichen Verwaltungsverfahren nach BBergG (BBERG 2009) und die ABergV (ABBERG 2012) bedarf. Im Vordergrund dieser gesetzlichen Schriften stehen die Forderungen nach der Sicherheit, dem Gesundheitsschutz und dem Umweltschutz bei der Errichtung untertägiger Anlagen und bei der Untergrundspeicherung⁷ bzw. bei Anlagen, die in ihrer Art zur Untergrundspeicherung geeignet sind (BBergG 2009 / §1 Nr. 3 ABBERG 2012) und deren Prüfung und Abnahme nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erfolgt (§138 Nr. 1 BBERG 2009).

⁷ Untergrundspeicherung wird in diesem Zusammenhang nach §4 und §126 BBERG 2009 als eine behälterlose Speicherung definiert.

Dabei ist sicherzustellen, „dass die Abfallentsorgungseinrichtung die erforderliche Standfestigkeit aufweist“ und der Standort (Wirtsgestein) geologisch, hydrogeologisch und geotechnisch geeignet ist (Anhang 6 Nr. 2 in ABERGV 2012). Generell steht die sichere Errichtung einer untertägigen Anlage im Mittelpunkt, konkrete Anforderungen an die Sicherheit geotechnischer Verschlussbauwerke sind allerdings nicht enthalten.

4.2.2 Richtlinien und Empfehlungen

Die **Eurocodes** sind europäisch vereinheitlichte Bemessungsregeln im Bauwesen. In Deutschland werden die Eurocodes als technische Baubestimmung seit Juni 2012 mit einer Übergangsfrist bis zu zwei Jahren durch die länderspezifischen Bauordnungen verbindlich eingeführt. Da die Planung, Errichtung und der Betrieb eines untertägigen Endlagers allerdings der bergbehördlichen Aufsicht unterliegt, entfällt z.B. in Niedersachsen nach §1 Abs. 2 NBAUO (2012) eine dahingehend bindende Anwendbarkeit. Dessen ungeachtet können und werden in einzelnen Nachweisen Vorgaben aus den Eurocodes hilfsweise herangezogen, wenn ein Nachweis oder eine Nachweisführung zielführend erscheint. In den Eurocodes selbst finden sich Einschränkungen zu dessen Anwendbarkeit in Form von Hinweisen auf die Anwendung zusätzlicher Regelungen (DIN EN 1990 2010 Abschnitt 1.1), abweichender Nachweise (DIN EN 1990 2010 Abschnitt 3.5 Nr. 5) oder alternativer Anwendungsregeln, solange sie den Grundsätzen und den geforderten Ansprüchen des Eurocodes entsprechen (DIN EN 1997-1 2009 Abschnitt 1.4 Nr. 5).

Die DIN EN 1990 (2010) ist die Grundlagen-Norm für die Eurocodes DIN EN 1991-1999. In ihr werden die in allen Eurocodes verwendeten Begriffe definiert und die bei der nach dem anerkannten Stand der Technik zu erfolgenden Planung und Berechnung eines Tragwerks zu beachtende Prinzipien und Anforderungen zur Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit, Dauerhaftigkeit und zur Überprüfung der Zuverlässigkeit festgelegt. Wesentlicher Bestandteil ist das Bemessungskonzept der Grenzzustände mit Teilsicherheitsbeiwerten. Grenzzustände sind dabei für verschiedene Bemessungssituationen einzuhalten. Dafür werden Bemessungssituationen – definiert als „eine Reihe von physikalischen Bedingungen, die ersatzweise für die wirklichen Bedingungen innerhalb eines bestimmten Zeitabschnitts angenommen werden, für die die Tragwerksplanung nachweist, dass maßgebende Grenzzustände nicht überschritten werden“ (DIN EN 1990 2010 Abschnitt 1.5.2.2) – im Hinblick auf die anzuwendenden Teilsicherheitsbeiwerte in die folgenden vier Gruppen unterteilt (DIN EN 1990 2010 Abschnitt 3.1 Nr. 4 und Abschnitt 3.2):

- ständige Situationen: Situationen, die den üblichen Nutzungsbedingungen des Tragwerks entsprechen, d.h. regelmäßige Einwirkungen.
- Vorübergehende Situationen: Situationen, die sich auf zeitlich begrenzte Zustände des Tragwerks beziehen, d.h. zeitlich begrenzte Einwirkungen.
- Außergewöhnliche Situationen: Situationen, die sich auf außergewöhnliche Bedingungen für das Tragwerk beziehen, d.h. außergewöhnliche, seltene bzw. im Auftreten gering wahrscheinliche Einwirkungen.
- Situationen bei Erdbeben: Situationen, die Erdbebeneinwirkungen auf das Tragwerk umfassen.

„Bei jeder geotechnischen Bemessungssituation muss sichergestellt sein, dass kein [...] definierter Grenzzustand überschritten wird“ (DIN EN 1997-1 2009 Abschnitt 2.1), damit die Funktionsfähigkeit des Tragwerks gewährleistet ist (DIN EN 1990 2010 Abschnitt 3.2). Für diese Forderung sind Detailbeschreibungen von Bemessungssituationen notwendig, die u.a. Einwirkungen, ihre Kombinationen und Lastfälle, die Gesamtstandsicherheit und Bewegungen im Untergrund, die allgemeine geologische Situation, die Auswirkungen von Erosion auf die Geländeform und von chemischer Korrosion auf die Bauwerke, die Gasaustritte im Untergrund und die Verformungs-

empfindlichkeit des Bauwerks umfassen (DIN EN 1997-1 2009 Abschnitt 2.2). Die für die Bemessungssituationen festzulegenden Grenzzustände werden sehr allgemein als „Zustände, bei deren Überschreitung das Tragwerk die Entwurfsanforderungen nicht mehr erfüllt“ (DIN EN 1990 2010 Abschnitt 1.5.2.12), definiert. Dabei darf zum Nachweis der Tragfähigkeit die Sicherheit von Personen und/oder der Tragwerke nicht gefährdet sein, was im Bedarfsfall je nach Tragwerksart Nachweise zur Lagesicherheit, übermäßiger Verformung und Versagen durch Materialermüdung oder anderer zeitabhängiger Auswirkungen wie z.B. inneres Versagen, Festigkeitsversagen, hydraulischer Grundbruch, innere Erosion und Piping erfordert (DIN EN 1990 2010 Abschnitt 3.3 / DIN EN 1997-1 2009 Abschnitt 2.4.7). Die Nachweise der Gebrauchstauglichkeit sollen durch Nachweiskriterien wie Verformungen, Verschiebungen, Schwingungen und sonstige Einflüsse, die Schäden der Dauerhaftigkeit oder Funktionsfähigkeit hervorrufen, sowohl die „Funktion des Tragwerks und das Wohlbefinden des Nutzers gewährleisten als auch das Erscheinungsbild des Bauwerks (z.B. Durchbiegungen, Rissbildung) nicht verändern“ (DIN EN 1990 2010 Abschnitt 3.4). Die Nachweise der Dauerhaftigkeit umfassen die Betrachtung chemischer Einflüsse (aggressive Substanzen), die auf die verwendeten Baustoffe und damit auf die Widerstandsfähigkeit in Form von Korrosion und Alterung wirken (DIN EN 1997-1 2009 Abschnitt 2.3). Eine weitere Forderung ist, dass während der vorgesehenen Nutzungszeit eine angemessene Zuverlässigkeit gegenüber möglichen Einwirkungen und Einflüssen als auch der Gebrauchstauglichkeit sicherzustellen ist (DIN EN 1990 2010 Abschnitt 2.1). Bei dem Nachweis der Zuverlässigkeit kommen differenzierte Zuverlässigkeitsniveaus zur Anwendung. Die Wahl des Zuverlässigkeitsniveaus erfolgt über Schadensfolgen, Zuverlässigkeitsindices oder Veränderung der Teilsicherheitsbeiwerte.

Die Festlegung der genauen geotechnischen Anforderungen an die einzelnen Bauwerke basiert auf der Zuordnung zu einer von drei geotechnischen Kategorien, durch die „bautechnische Maßnahmen und Verfahren nach dem Schwierigkeitsgrad des Bauwerks, der Baugrundverhältnisse sowie der zwischen ihm und der Umgebung bestehenden Wechselwirkungen“ (HANDBUCH EUROCODE 7 2011 A 1.5.3.1) bestimmt werden. Nach dem HANDBUCH EUROCODE 7 (2011 Anhang AA) können geotechnische Bauwerke für ein Endlager überwiegend der geotechnischen Kategorie 3 (höchste Kategorie), selten der geotechnischen Kategorie 2, zugeordnet werden. Allerdings gehen die Regelungen und Anforderungen der DIN EN 1990 und DIN EN 1997-1/2 im Grundsatz von den Bauwerken der geotechnischen Kategorie 2 aus und gelten sozusagen nur als Mindestanforderungen für Bauwerke der geotechnischen Kategorie 3 (DIN EN 1997-2). Welcher zusätzliche Aufwand bei den rechnerischen Nachweisen oder der Bauwerksbemessung für die geotechnische Kategorie 3 erforderlich ist, wird in keiner der Eurocodenormen geregelt (SCHUPPENER 2012).

Die geotechnische Bemessung nach den Eurocodes beruht auf den Bemessungswerten von Einwirkungen, Widerständen (Baustoff- und Bauteileigenschaften) und geometrischen Maßen, die entweder direkt festgelegt oder unter Anwendung von Teilsicherheitsbeiwerten und Kombinationsbeiwerten aus charakteristischen bzw. repräsentativen Werten ermittelt werden. Die rechnerischen Nachweise zur Einhaltung des Grenzzustandes basieren auf analytischen, halbempirischen und numerischen Verfahren. Werden statistische Verfahren benutzt, „sollte der charakteristische Wert so abgeleitet werden, dass für den Grenzzustand die rechnerische Wahrscheinlichkeit für einen ungünstigeren Wert nicht größer als 5 % ist“ (DIN EN 1997-1 2009 Abschnitt 2.4.5.2) bzw. die Werte „für den oberen charakteristischen Wert die 95 %-Fraktile“ gelten (DIN EN 1990 2010 Abschnitt 4.2 (3)). Ob eine Bemessung mit Teilsicherheitsbeiwerten für ein untertägiges geotechnisches Verschlussbauwerk anwendbar ist, ist fraglich (siehe Kapitel 9).

Die **DAfStb-Richtlinie BUMWS** (DAFSTB 2011) gibt Anforderungen an die Planung und Bauausführung von Betonbauwerken für Anlagen, in denen wassergefährdende Stoffe enthalten

sind. Sie richtet sich dabei nach dem Besorgnisgrundsatz des § 62 WHG (2013) und erweitert die üblichen Nachweise der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit des Eurocodes (besonders der DIN EN 1992-1-1) um vertiefende Nachweise zur Sicherstellung der Dichtigkeit. Dies umfasst neben den spezifizierten Anforderungen an die Baustoffe (Teil 1 BUMwS) auch die Rechenwerte für die Bemessung sowie Angaben zur Eindringtiefe von wassergefährdenden Stoffen in Beton und die Schädigungstiefe von Beton bei chemischen Angriffen (Teil 2 BUMwS). Erweiterungen zu den Eurocodes treten auch im Bereich der Sicherheitsbeiwerte, bezogen auf die Eindringtiefe und des Betontragverhaltens für unterschiedliche Rissbreiten - max. Rissbreite $\leq 0,1$ mm (DAFSTB 2011 Abschnitt 3 Teil 1 BUMwS), auf. Weitere Diversifikationen zeigen sich bei den zu betrachtenden Einwirkungen (DAFSTB 2011 Abschnitt 4.1 bis 4.4 Teil 1 BUMwS). Bei physikalischen und chemischen Einwirkungen wird der charakteristische Wert der Eindringtiefe bzw. Schädigungstiefe gefordert. Bei den mechanischen Einwirkungen müssen neben den Einwirkungen gemäß den Eurocodes auch Einwirkungen aus Last, Verformungsbehinderung (Bauwerk-Baugrund oder zwischen Bauwerksteilen) und Verzerrungszuständen berücksichtigt werden. Letzteres umfasst u.a. die Hydratationswärme, die Witterungseinflüsse, das Schwinden und Kriechen, die Bauwerk-Baugrund-Wechselwirkung und die Temperatur aus den eingelagerten Behältern. Bei der geforderten Berücksichtigung der Kombination von Einwirkungen für den Dichtigkeitsnachweis sind einerseits die Zeitpunkte der Beaufschlagung mit wassergefährdenden Stoffen als auch die vorausgegangenen Einwirkungen und deren Auswirkungen einzubeziehen (DAFSTB 2011 Abschnitt 4.4 Teil 1 BUMwS). Die Berechnung von kombinierten Einwirkungen vor der Beaufschlagung entspricht der Berechnung der „charakteristischen Kombination“ gemäß den Eurocodes. Zusätzlich wird die Kombination von Einwirkungen während einer Beaufschlagung betrachtet.

Der Nachweis der Dichtigkeit des Gesamtbauwerks kann vereinfacht (DAFSTB 2011, Abschnitt 5.1.2 Teil 1 BUMwS) oder genauer (DAFSTB 2011 Abschnitt 5.1.3 bis 5.1.5 Teil 1 und Abschnitt 4 Teil 2 BUMwS) erfolgen. Genauere Nachweise erfordern u.a. Kenntnisse über Betonzugspannungen, Sicherheitsbeiwerte, Eindringtiefen, Biegezugfestigkeiten und kritische Rissbreiten. Die Eindringtiefe und Schädigungstiefe spielen bei der Bemessung eines Dichtbauwerks eine besondere Rolle. Deshalb werden nach der DAfStb-Richtlinie BUMwS das Eindringen von wassergefährdenden Stoffen in nicht gerissenem und gerissenem Beton jeweils mit und ohne chemischem Angriff (bei nicht gerissenen Beton zusätzlich mechanischen Angriff) als auch Eindringtiefen bei einmaliger Beaufschlagung betrachtet (DAFSTB 2011 Abschnitt 4 Teil 2 BUMwS).

Betonbauten nach dieser Richtlinie müssen bei den zu erwartenden Einwirkungen für eine jeweils festgelegte Dauer während und nach der Beaufschlagung die geforderte Dichtigkeit aufweisen. Dies schließt auch die Dichtigkeit von Bauteilen in den Bereich von Bauwerksfugen, an Übergängen zu anderen Dichtkonstruktionen (DAFSTB 2011 Abschnitt 5 Teil 1 BUMwS) als auch zum Nebengebirge, z.B. durch Fugenabdichtungen oder Rissinjektionen, ein. Neben einigen anderen Konstruktionsgrundsätzen sollte u.a. eine sichere Verbundwirkung zwischen Bauwerk-Baugrund als auch für Fugen und Fugenbleche bestehen und Beanspruchungen aus Verformungsbehinderungen durch den Einbau von Gleitschichten begrenzt werden (DAFSTB 2011, Abschnitt 7.1 (5) und 7.3 Teil 1 BUMwS). Der Einbau von „zwangserzwungenden“ Verzahnungen mit dem Baugrund sind nach Abschnitt 7.1 (4) Teil 1 BUMwS allerdings zu vermeiden.

Die DAfStb-Richtlinie BUMwS gibt in Bezug auf die Eurocodes erweiterte Anforderungen an die Dichtigkeit von Bauwerken, die Festlegung der Sicherheitsbeiwerte als auch die Konstruktion und Bauausführung, bezieht sich allerdings, genauso wie die Eurocodes, auf eine Möglichkeit der Kontrolle, Wartung und Instandhaltung (DAFSTB 2011, Abschnitt 3 und 7.1 Teil 1 BUMwS).

Neben dem Eurocode bilden die **GDA-Empfehlungen** (GDA 1997) eine weitere Grundlage bei der allgemeinen ingenieurtechnischen Bauwerksauslegung. Sie beschreiben die Geotechnik im

Deponie- und Altlastenbereich nach dem Stand der Technik. Obwohl die GDA-Empfehlungen in Verbindung mit der DEPV 2012 stehen, deren Anwendungsbereich bezogen auf das KrWG 2012⁸ radioaktive Abfälle ausschließt, zeigen sie grundlegende Anforderungen an die geotechnische Bemessung von Bauwerken, die im Zusammenhang mit umweltgefährdenden Abfällen stehen. Daher könnte ggf. eine sinngemäße Anwendung auf radioaktive Abfälle möglich sein. Das grundsätzliche Ziel bei der Untertagedeponierung in Bergwerken des Salzgebirges von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen ist der „vollständige, dauerhafte und nachsorgefreie Einschluss der abgelagerten Abfälle [...] nach dem Multibarrierenprinzip“ (GDA 1997 S. 390). Dabei sind die Standfestigkeit (Tragfähigkeit) und die Funktionstüchtigkeit (Gebrauchstauglichkeit / Verformungssicherheit) unter Einbezug der Wechselwirkungen von Verschlusssystem und Gebirge sowie bei Mehrfachbelastungen nachzuweisen (GDA E 2-28, E 9-2.3, E 2-17.2). Für den Nachweis der zu erfüllenden Aufgabe von Dammbauwerken, Gase und Flüssigkeiten von den übrigen Grubenbereichen fernzuhalten (GDA E 9-2.5.2.1) bzw. die langfristige Minimierung von Emissionen aus der Deponie (GDA E 2-17) sicherzustellen, sind die Abdichtwirkung und das Schadstoffrückhaltevermögen von Bedeutung (GDA E 2-8). Um diese Funktion des Bauwerks zu gewährleisten, werden Anforderungen an die Dichtigkeit (einschließlich Ausschluss von Umlaufen), Standsicherheit, Beständigkeit (bezogen auf Chemie, Temperatur, Hydraulik, Biologie auch unter Einfluss kontaminiertem Milieus) und Herstellbarkeit gestellt (GDA E 2-17 / E 13). Detailliertere Beschreibungen der Anforderungen und der zugehörigen nachzuweisenden Eigenschaften und Lastfälle erfolgen in Kapitel 8.3. Die Systemdurchlässigkeit von mineralischen Abdichtungen wird durch den Durchlässigkeitsbeiwert bestimmt, der nach DIN 18130 - 1(1998) ermittelt wird (GDA 2.15). Die Regelungen dieser Norm beziehen sich auf die Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts von Böden (Lockergestein), so dass Materialien mit einem k_f -Wert $< 10^{-9}$ m/s als nahezu undurchlässig gelten. Diese Norm wird auch zur Prüfung von Dichtwandmassen herangezogen.

Bezogen auf §7 Abs. 2 Nr. 3 ATG (2012) werden Anforderungen an Kernkraftwerke und kerntechnische Anlagen durch das untergesetzliche kerntechnische Regelwerk (**KTA-Regelwerk**, KTA 2011) konkretisiert. Da wie bereits festgestellt wurde, ein Endlager für (hoch)radioaktive Abfälle keine kerntechnische Anlage ist, sind diese Empfehlungen nicht direkt anzuwenden. Aufgrund dessen, dass die Regelungen allerdings in atomrechtlichen Genehmigungsverfahren herangezogen werden können (KTA-SICHERHEITSGRUNDLAGEN Abschnitt 1.4 Nr. 1), wäre eine indirekte bzw. sinngemäße Anwendung möglich. Ob eine solche sinngemäße Anwendung auch für geotechnische Barrierebauwerke für ein Endlager erfolgen kann, ist fraglich (vgl. Kapitel 4.2.3).

Grundsätzlich werden in den KTA-Empfehlungen sicherheitstechnische Anforderungen angegeben, deren Einhaltung die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderliche Schadensvorsorge durch die Errichtung und den Betrieb der Anlage darstellt. Das KTA-Regelwerk ist im Grundsatz hierarchisch aufgebaut und besteht aus den übergeordneten Sicherheitsgrundlagen und den folgenden Basis- und konkretisierenden Fachregeln. Die ausführungsunabhängigen und ausführungsabhängigen Anforderungen beziehen sich grundsätzlich auf vier Schutzziele, die sich den gleichnamigen Basisregeln 1 bis 4 zuordnen lassen und nach den Sicherheitsebenen eines gestaffelten Sicherheitskonzeptes geordnet sind (Nr. 1: Kontrolle der Radioaktivität, Nr. 2: Kühlung der Brennelemente, Nr. 3: Einschluss radioaktiver Stoffe, Nr. 4: Begrenzung der Strahlenexposition). In Ergänzung sind übergeordnete Anforderungen in den Basisregeln 5 bis 7 einzuhalten, die entweder den Sicherheitsebenen direkt zugeordnet oder

⁸Das KrWG ersetzt seit 1. Juni 2012 das KrW-/AbfG vom 27. September 1994 (Artikel 1 G. v. 27.09.1994 BGBl. I S. 2705; aufgehoben durch Artikel 6 Abs. 1 G. v. 24.02.2012 BGBl. I S. 212) und damit das Abfallgesetzes (AbfG) vom 27. August 1986 (BGBl. I S. 1410, ber. S. 1501) sowie das Gesetz über die Beseitigung von Abfällen (Abfallbeseitigungsgesetz – AbfG) vom 7. Juni 1972 (BGBl. I S. 873).

Ebenen übergreifend formuliert sind (z.B. Nr. 5: allgemeine technische Anforderungen, Nr. 6: Methodik der Nachweisführung, Nr. 7: personell-organisatorische Maßnahmen). Das gestaffelte Sicherheitskonzept umfasst vier Ebenen, woraus sich die Anforderungen an die Wirksamkeit und Zuverlässigkeit ergeben: Sicherheitsebene 1 (Normalbetrieb, Instandhaltungsvorgänge), Sicherheitsebene 2 (anomaler Betrieb), Sicherheitsebene 3 (Störfälle) und Sicherheitsebene 4 (spezielle Ereignisse und Zustände) (KTA-SICHERHEITS-GRUNDLAGEN Abschnitt 2). Die Zuordnung von Ereignissen, Ereignisabläufen und Zuständen, die repräsentativ für die einzelnen Ebenen sind, basiert auf festgelegten Eintrittswahrscheinlichkeiten ($> 10^{-2}$ 1/a für die Sicherheitsebene 1 und 2; $10^{-2} > h_3 \geq 10^{-5}$ 1/a für die Sicherheitsebene 3; $< 10^{-5}$ 1/a für die Sicherheitsebene 4) (KTA-BR 6 Abschnitt 4.2 (6)). In den dadurch entstehenden Lastfallklassen (Auslegungsfälle, Normale-anormale und Prüffälle, Not- und Schadensfälle) werden für die ihrerseits zugeordneten Beanspruchungsstufen (Auslegungsstufe, verschiedene Betriebsstufen) Druck-, Temperatur-, Spannungsbelastungsprüfungen durchgeführt (KTA 3201.2, KTA 3211.2). Die allgemeine Nachweisführung stützt sich auf das im Eurocode angewendeten Bemessungskonzept mit Grenzzuständen und Teilsicherheitsbeiwerten und basiert auf deterministischen Sicherheitsbewertungsmethoden, die durch probabilistische Methoden ergänzt werden sollen (KTA-BR 6 Abschnitt 3, KTA SICHERHEITSGRUNDLAGEN). Die Nachweisführung umfasst die Sicherstellung der Integrität der zu betrachtenden Komponente (z.B. hinsichtlich Festigkeit, Bruchsicherheit, Dichtigkeit, Standsicherheit, Funktionsfähigkeit), um den sicheren Einschluss von flüssigen und gasförmigen radioaktiven Stoffen im Hinblick auf Luft- und Wasserwegsamkeiten zu gewährleisten (KTA-BR 3). Bei der konstruktiven Auslegung muss somit ein Undichtwerden oder Umfließen der Abdichtung ausgeschlossen werden, wobei Fugenabdichtungen und Alterungsvorgänge einbezogen werden müssen (KTA 1403, KTA 3603, KTA 2501). Durch das Nachweisziel ergeben sich technische Anforderungen an die Werkstoffauswahl (z.B. Festigkeit, Zähigkeit, physikalische und chemische Eigenschaften und Korrosionsbeständigkeit), die im Zusammenhang mit der konstruktiven Gestaltung die Integrität, auch bei Belastungen (z.B. Korrosion, Feuchte, Ermüdung) infolge möglicher Einwirkungen, einschließlich deren Wechselwirkungen und zeitlichen Verhalten, sicherstellen (KTA-BR 5).

In Anlehnung an den Eurocode werden die zu betrachtenden Einwirkungen in:

- unabhängige ständige Einwirkungen,
- unabhängige Einwirkungen infolge Vorspannung,
- vorherrschende unabhängige veränderliche Einwirkungen,
- andere unabhängige veränderliche Einwirkungen,
- außergewöhnliche Einwirkungen,
- und in Einwirkungen infolge Erdbeben

unterteilt (KTA-GS-78, gekürzt in KTA-BR 5 und KTA 2502). Bei allen, außer den außergewöhnlichen Einwirkungen, werden dabei charakteristische Werte verwendet, die so festgelegt werden müssen, dass sie mit einer Wahrscheinlichkeit von 98% während einer Beanspruchung innerhalb eines Jahres nicht überschritten werden (Anhang A in KTA-GS-78). Für alle außergewöhnlichen Einwirkungen werden Bemessungswerte benutzt. Die in den KTA-Empfehlungen angegebenen Teilsicherheitsbeiwerte für die jeweiligen Einwirkungen weichen stellenweise vom Eurocode ab (KTA 2502 / KTA-GS-78 / Anhang B).

Die Einwirkungsarten werden bei der Auslegung von Bauteilen unter Berücksichtigung von Eintrittswahrscheinlichkeiten, Reparaturmöglichkeiten und Begrenzung des Schadensumfangs kombiniert und drei Anforderungskategorien zugeordnet, aus denen die Tragwiderstände der Bauteile und Komponenten bestimmt werden (KTA 2502). In der Anforderungskategorie 1 werden Kombinationen von ständigen und vorübergehenden Bemessungssituationen nach dem Eurocode betrachtet, wobei die volle Funktionssicherheit, wiederholte Belastbarkeit und fortdauernde

Wiederverwendbarkeit sicherzustellen ist. Veränderliche oder außergewöhnliche Einwirkungen, bei denen ein mehrfaches Auftreten vermutet wird, sind der Anforderungskategorie 2 zuzuordnen. Bei diesen Kombinationen muss nach ihrem Auftreten die Funktionsfähigkeit weiterhin gewährleistet sein. Die Anforderungskategorie 3 umfasst außergewöhnliche Einwirkungen mit einmaligem Auftreten und geringer Eintrittswahrscheinlichkeit. Dabei sind große plastische Verformungen einschließlich großer Rissausbildungen zugelassen, sofern sie nicht den sicherheitstechnischen Belangen entgegenstehen. Bei Lastfallkombinationen ist ein ausreichender Sicherheitsfaktor für plastische Instabilität, globale Verformung, fortschreitende Deformation, Ermüdung und Bruch infolge instabiler Rissausbildung anzusetzen (KTA-BR 3). Die Kombinationsregeln entsprechen dabei denen des Eurocodes, wobei abweichende Kombinationsbeiwerte verwendet werden (KTA 2502 / KTA-GS-78).

Direkte Anforderungen der KTA für Bauwerksabdichtungen umfassen vorwiegend thermische und mechanische Beanspruchungen, die sich aus der Bauwerkskonstruktion und dem Untergrund ergeben (KTA-BR 5 / KTA 2501). Zusätzlich ist eine ausreichende Stabilität gegen resultierende Beanspruchungen aus Hochwasser (bzw. Überflutung) und Erdbeben sowie eine Rissbegrenzung aus dynamischen (Flächenbeanspruchungen senkrecht und parallel zur Abdichtungsebene, Spaltöffnungen im Sohlenbereich) und statischen Beanspruchungen zu gewährleisten. Einwirkungen werden zur Ermittlung der Belastungen auf die Abdichtung kombiniert. So sind z.B. die Einwirkungen eines Hochwassers „mit den [zu diesem Zeitpunkt auftretenden] Einwirkungen [z. B. Eigenlast, ständige Last, Erddruck] und den Einwirkungen aus möglichen Folgeereignissen zu überlagern“ (KTA 2207 Abschnitt 5 Punkt 1). Für die Bauwerksabdichtungen und deren Fugenkonstruktion in Bezug auf eindringendes Wasser wird auf die DIN-Reihe 18195 verwiesen. Diese schließt zwar Abdichtungen für Deponien, Erdbauwerken und bergbauliche Tunnel in ihrem Anwendungsbereich aus und befasst sich in ihren Werkstoffen nicht mit Beton, könnte aber bei Verschlussmaterialien aus Bitumen sinngemäß herangezogen werden. Nach der DIN-Reihe 18195 und KTA 2501 muss die Funktion der Abdichtung trotz chemischer Beanspruchungen durch das auftretende Wasser, Temperaturänderungen, Schwinden und Setzungen gewährleistet sein, wobei auftretende Risse je nach eingesetztem Material in deren Breite zwischen 0,2 bis 1,0 mm liegen dürfen (DIN 18195-6 2000, DIN 18195-7 2009). Abweichend von der DIN 18195 ist in der KTA 2501 eine Grenzrissbreite bei dynamischen Beanspruchungen aus Störfällen von 4 mm bzw. eine mittlere Rissbreite auf 30% der Grenzrissbreite – somit 1,2 mm – einzuhalten (KTA 2501 Abschnitt 4).

Empfehlungen zum Sicherheitsniveau für ein Endlager in tiefen geologischen Formationen finden sich in den **Sicherheitsanforderungen des BMU** (2010). „Diese Sicherheitsanforderungen gelten ausschließlich für ein zu errichtendes Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ersetzen diesbezüglich die [...] 1983 [...] bekannt gemachten Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk“ (BMU 2010 S. 3). Der geforderte Sicherheitsnachweis umfasst Aussagen über die Betriebsphase und die wartungsfreie Langzeitsicherheit hinsichtlich der Einhaltung der aufgestellten Schutzziele und Sicherheitsprinzipien (siehe Kapitel 3). Für die Betriebsphase werden dabei die Anforderungen aus dem AtG, der StrSchV, des BBergG und den Empfehlungen für kerntechnische Anlagen, die, bis auf die Anforderung zum Einbezug der vier Sicherheitsebenen aus dem KTA-Regelwerk, nicht spezifiziert werden, hinzugezogen (BMU 2010 Abschnitt 7.1). Die Sicherheitsanalysen sind unter Berücksichtigung von definierten Auslegungsstörfällen durchzuführen. Dabei muss die Robustheit des Endlagersystems dargestellt und für die „Teilsysteme oder Einzelkomponenten die jeweiligen Wahrscheinlichkeiten von Einwirkungen, Ausfällen oder Abweichungen vom Erwartungsfall (Referenzfall)“ berechnet oder abgeschätzt und hinsichtlich ihrer Auswirkungen analysiert werden (BMU 2010 Abschnitt 7.1 S. 13). Aussagen über die Relevanz der Ausfälle basieren auf probabilistischen Methoden.

Der Nachweis der Langzeitsicherheit umfasst Aussagen zur Integrität, Radiologie, Robustheit und zum Ausschluss von Kritikalität (BMU 2010 Abschnitt 7.2).

Der Nachweis der Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ist gegeben, wenn für wahrscheinliche Entwicklungen sekundäre Wegsamkeiten, die zum Eindringen oder Austreten wässriger Lösungen führen können, und die Teilnahme von Porenwasserlösungen am hydrogeologischen Kreislauf ausgeschlossen werden können (BMU 2010 Abschnitt 7.2.1). Zusätzlich ist laut BMU 2010 (Abschnitt 7.2.1) zu prüfen, ob die zu erwartenden Beanspruchungen unterhalb der Dilatanzfestigkeiten der Gesteinsformationen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs liegen, die zu erwartenden Fluiddrücke die Fluiddruckbelastbarkeiten der Gesteinsformationen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs überschreiten (Ausschluss eines Zutritts von Grundwasser) und ob durch die Temperaturentwicklung die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht unzulässig beeinflusst wird.

Das BMU verschärft dabei die Anforderungen der StrSchV und der internationalen Vorschläge hinsichtlich der radiologischen Sicherheit. Für die Nachverschlussphase ist der Nachweis erforderlich, „dass für wahrscheinliche Entwicklungen durch die Freisetzung von Radionukliden, die aus den eingelagerten radioaktiven Abfällen stammen, für Einzelpersonen der Bevölkerung nur eine zusätzliche effektive Dosis im Bereich von 10 Mikrosievert im Jahr [0,01 mSv/a] auftreten kann“ (BMU 2010 Abschnitt 6.2 S. 12). Für weniger wahrscheinliche Entwicklungen liegt die zusätzlich auftretende effektive Dosis bei 0,1 mSv/a (BMU 2010 Abschnitt 6.3). Alternativ ist „eine vereinfachte radiologische Langzeitaussage ohne Modellierung einer Ausbreitung von Stoffen im Deck- und Nebengebirge [...] zulässig, falls die jährlich aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich freigesetzten radioaktiven Stoffe für die Bevölkerung höchstens zu 0,1 Personen-Millisievert pro Jahr für wahrscheinliche und höchstens zu 1 Personen-Millisievert pro Jahr für weniger wahrscheinliche Entwicklungen führen“ (BMU 2010 Abschnitt 7.2.2 S. 14). In den VSG Betrachtungen befindet sich der Streckenverschluss am Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (FISCHER-APPELT ET AL. 2013). An dieser Position fungiert er als Sicherungsmaßnahme für die anthropogene Verletzung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs infolge des Ausbaus der Zugangsstrecken zum Einlagerungsbereich. Dementsprechend müsste dem Streckenverschluss die Sicherheitsanforderung an die Freisetzungsgrenze der vereinfachten radiologischen Langzeitsicherheitsaussage (BMU 2010) zugrunde gelegt werden.

Der Nachweis der langfristigen Robustheit technischer Komponenten, d.h. ihre Unempfindlichkeit gegenüber inneren und äußeren Einflüssen, basiert auf theoretischen Überlegungen (BMU 2010 Abschnitt 7.2.3). Es muss dabei nachgewiesen werden, dass die Integrität der geologischen Barriere durch Abdichtungs- und Verschlussbauwerke erhalten bleibt. Dies umfasst den Erhalt der Funktionstüchtigkeit geotechnischer Verschlussbauwerke bei „maßgeblichen Beanspruchungszustände[n]“, wobei eine ausreichende Belastbarkeit und Alterungsbeständigkeit der Baustoffe nachzuweisen ist (BMU 2010 Abschnitt 7.2.3 S. 15). Die numerische Analyse des Langzeitverhaltens basiert auf deterministischen Berechnungen, denen möglichst relativitätsnahe Modellierungen zugrunde liegen sollten. „Zusätzlich sind Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen durchzuführen, um den möglichen Lösungsraum aufzuzeigen sowie den Einfluss der Unsicherheiten einschätzen zu können“ (BMU 2010 Abschnitt 7.3 S. 16).

Konkretere Anforderungen an die Auslegung von untertägigen Dammbauwerken finden sich in **verschiedenen Empfehlungen** für die Bereiche der Untertagedeponierung und Endlagerung. Obwohl sich die Empfehlungen der Untertagedeponierung ebenso wie die GDA-Empfehlung auf das KrWG (und dessen zugehörige Verordnungen, z.B. TA-Abfall, DepV) beziehen, welches radioaktive Abfälle im Anwendungsbereich ausschließt, sollten sie dennoch auch bei der Planung, Errichtung und der langzeitsicheren Auslegung von geotechnischen Verschlussbauwerken für ein Endlager für radioaktive Abfälle berücksichtigt werden. Grundlegend ist dabei die Betrachtung des Gesamtsystems „Abfall/Bauwerk/Gebirgskörper“ unter der Berücksichtigung planmäßiger und

außerplanmäßiger Ereignisabläufe, um den Schutz des Menschen und der Umwelt vor den eingelagerten gesundheitsgefährdenden Stoffen dauerhaft zu gewährleisten. Zur Gewährleistung dieses Schutzziels sollen die geotechnischen Barrieren einen Austritt von Schadstoffen vermeiden oder so behindern, dass das Schutzziel eingehalten wird.

Aus den Ergebnissen des Arbeitskreises „Salzmechanik“ (z.B. EMPFEHLUNG DES ARBEITSKREISES SALZMECHANIK 1990 & 1993), der EMPFEHLUNG FÜR FELSBOHLRÄUME (1994), der TA-ABFALL (1993), der VERSATZV (2002), der DEPV (2012), von DÜSTERLOH (2009 & 2013) sowie aus dem Workshop GRS & PTKA WTE (2011) ergeben sich folgende grundsätzliche Anforderungen an ein untertägiges geotechnisches Damm- bzw. Barrierebauwerk:

- sofortige Wirksamkeit gegenüber einem Lösungszutritt,
- langfristige bzw. dauerhafte Wirksamkeit in der Nachverschlussphase für die wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagers,
- bidirektionale Auslegung,
- redundante und diversitäre Auslegung,
- Durchlässigkeit und Permeabilität in der Größenordnung des umgebenden Gebirges,
- Trennung von Dicht- und Tragwirkung,
- drucktechnische Auslegung gegen hydrostatischen Flüssigkeitsdruck (ohne Funktionsverlust; separate Betrachtung der Auswirkungen durch komprimierte Gase),
- Zunahme der Dichtwirkung mit der Standzeit,
- Kurzzeit- und Langzeitdichteelemente,
- wartungsfreie Ausführung,
- langzeitbeständige Baumaterialien (korrosions- und temperaturbeständig),
- Auslegung der Tragfähigkeit und Dichtigkeit bis zum Zeitpunkt, bei dem die geologische Barriere verheilt ist und dadurch die Abdichtfunktion übernommen wird.

Um die Funktionsfähigkeit eines untertägigen geotechnischen Damm- bzw. Barrierebauwerkes zu gewährleisten, muss neben den Anforderungen an die technische Konstruktion auch das daran angrenzende Gebirge in die Betrachtung einbezogen werden. Dahingehend wird ein Standort des Verschlussbauwerks in einem homogenen, tektonisch und bergbaulich unbeeinflussten Gebirge gefordert. Um die dauerhafte Einhaltung des Schutzziels während einer nachsorgefreien Nachbetriebsphase zu zeigen, werden Nachweise zur Funktionstüchtigkeit hinsichtlich einer ausreichenden Tragfähigkeit und Integrität durchgeführt. Bei der Nachweisführung sollten neben den laborativen Belegen der THMC⁹-Materialeigenschaften und den Funktionalitätsnachweisen durch in-situ-Versuche auch die lokationsspezifischen Gebirgseigenschaften sowie die Wechselwirkung zwischen Konstruktion und Gebirge einbezogen werden. Durch die Heterogenität des Gebirges ist eine solche standortbezogene Sicherheitsbeurteilung auf andere Dimensionierungsaufgaben im Hinblick auf eine ausreichende Sicherheitsgewährleistung nicht übertragbar.

4.2.3 Sinngemäße Anwendung normativer und regulatorischer Regelwerke

Da keines der normativen und regulatorischen Regelwerke direkt auf eine geotechnische Auslegung eines Streckenverschlussbauwerkes in einem Endlager für (hoch)radioaktive Abfälle Bezug nimmt, wird bei derzeitigen Bemessungskonzepten dazu übergegangen, vorhandene Regelwerke sinngemäß einzubeziehen. Eine sinngemäße Anwendung wirkt bezüglich der Handhabbarkeit allerdings Fragen aufgrund unterschiedlicher Intentionen von Begrifflichkeiten und Sicherheitskonzeptionen, Vorgehensweisen und detaillierten Forderungen auf.

⁹ thermisch (T) - hydraulisch (H) - mechanisch (M) - chemisch C

Erste Fragen entstehen bereits hinsichtlich der Unstimmigkeiten im Verständnis von **Begrifflichkeiten**. So ist die Definition des Begriffes des im AtG benutzten „sicheren Einschlusses“ (§7 Abs. 3 ATG 2012) auf eine Stilllegungsstrategie für kerntechnische Anlagen zurückzuführen. Bei dieser wird laut BFS (2012) „eine kerntechnische Anlage für einen längeren Zeitraum in einen praktisch wartungsfreien Zustand überführt, wobei der endgültige Abbau und die Entlassung aus der atomrechtlichen Überwachung auf einen späteren Zeitraum verschoben wird“. Im Bereich der Langzeitsicherheitsbetrachtung für ein Endlager umfasst die Stilllegung „alle nach Einstellung der Einlagerung getroffenen Maßnahmen einschließlich Verschluss des Endlagers zur Herstellung eines wartungsfreien Zustandes, der die Langzeitsicherheit des Endlagers gewährleistet“ (BMU 2010 Abschnitt 2 S. 8). Bei der ersten Betrachtung beider Definitionen ist zwar der gleiche Sicherheitsgedanke zu erkennen, jedoch stecken unterschiedliche Intentionen dahinter. Abgesehen davon, dass es noch einer Klärung bedarf, wann oder ob für ein Endlager eine Entlassung aus der atomrechtlichen Überwachung vorliegen wird, ist das Ziel bei einem sicheren Einschluss nach dem ATG (2012) dahingehend festgesetzt, dass nach einem absehbar endlichen, praktisch wartungsfreien Zeitraum ein weiterer Zugriff zu den Abfallstoffen erfolgen muss, um einen durch die Wartezeit resultierenden strahlungsärmeren Zustand der Abfälle und damit einen sicheren Abbau einer kerntechnischen Anlage zu gewährleisten. Diese Intention eines erneuten Zugriffs auf die Abfälle nach einer Stilllegung ist bei einer Endlagerung in tiefegeologischen Formationen nicht vorhanden, da durch sie ein Einschluss und Isolation der Abfälle von der Biosphäre über weitaus längere Zeiträume (1 Million Jahre) vollständig wartungsfrei erfolgen muss. Da sich die Auslegungsanforderungen nach dem eigentlichen Zielgedanken richten, ist es fraglich, ob die Anforderungen aus den dem AtG untergeordneten KTA-Regeln für geotechnische Verschlussbauwerke herangezogen werden sollten.

Die Möglichkeit einer sinngemäßen Anwendung des KTA-Regelwerks für geotechnische Barrierebauwerke in einem Endlager ist auch wegen der Intention des **Sicherheitskonzeptes** fraglich. Dabei treten zwei Hauptaspekte hervor. Einerseits werden in den KTA-Regeln Anlagen ausgelegt, deren Schutzziele sich auf die Reaktorsicherheit (KTA-SICHERHEITSGRUNDLAGEN Abschnitt 3 Nr. 2) und damit nur auf die zeitlich begrenzte Betriebsphase beziehen, andererseits stützt sich das Einschluss-Sicherheitskonzept bei der Auslegung der Dichtelemente auf ein inneres System (Primärkreislauf – direkter Kontakt mit radioaktiven Stoffen, wartungsarm und fernhantiert) und ein äußeres System (außerhalb des Primärkreislaufes). Eine Übertragung dieser Begriffe (inneres/äußeres System) auf Endlagersysteme ist mit einer Reihe konzeptioneller Schwierigkeiten verbunden, die an dieser Stelle nicht weiter betrachtet werden. In Bezug auf ein Streckenverschlussbauwerk werden in den KTA-Empfehlungen zudem meist andere Komponenten und Werkstoffe als in einem Endlager angesprochen. Eine Anwendung oder Übertragung der KTA-Regeln ist nicht sinnvoll, da sich sowohl die dort betrachteten Konzepte und Werkstoffe als auch die Lastfälle deutlich von denen für die Endlagerung unterscheiden.

Die Frage der Übertragbarkeit der **Vorgehensweise** der Sicherheitsnachweise gemäß den vorliegenden Richtlinien und Empfehlungen für eine wartungsfreie Auslegung eines Bauwerks (z.B. DIN EN 1990ff, GDA, DAfStb, Großteil KTA) bildet eine weitere Problematik bei einer sinngemäßen Anwendung. Die geotechnischen Sicherheitsanforderungen aus diesen Regelwerken beziehen sich auf übertägige Bauwerke mit der Möglichkeit zur Ausbesserung. Ob diese Anforderungen bezüglich untertägiger Bauwerke den notwendigen Sicherheitsanspruch gewährleisten, ist noch nicht nachgewiesen. In diesem Zusammenhang stellt sich auch die Frage nach der Übertragbarkeit der Nachweisverfahren basierend auf Bemessungssituationen mit Grenzzuständen und Teilsicherheitsbeiwerten (Kapitel 10). An dieser Stelle ist bereits festzuhalten, dass für eine Bauwerksauslegung wichtige Unterschiede in den Sicherheitsanforderungen bei den statistischen Nachweisverfahren und in den Zahlenwerten der Teilsicherheits- und Kombinationswerte

bestehen. In der DIN EN 1990ff wird durch die Festlegung des charakteristischen Wertes eine Versagenswahrscheinlichkeit von maximal 5 % zugelassen, das KTA Regelwerk stellt die Forderung nach einer zulässigen Versagenswahrscheinlichkeit von maximal 2 %. Die Entscheidung, welche dieser Forderungen als verbindlich angesetzt wird, ist für die spätere Bemessung ausschlaggebend. Angesichts der Schwierigkeit, eine 2 %-ige Versagenswahrscheinlichkeit für geotechnische Komponenten zu belegen, stellt sich die Frage nach der Anwendbarkeit semiprobabilistischer Methoden. Auch weichen teilweise die Zahlenwerte der Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerte in den verschiedenen Regelwerken (DIN EN 1990ff, DAfStb, KTA-Regelwerk) voneinander ab. Zwar wird bei diesen Werten meist auf die DIN EN 1990ff verwiesen, doch liegen in den Empfehlungen der DAfStb und der KTA diesbezügliche Veränderungen und Erweiterungen vor (vgl. Anhang B). Eine Erweiterung zeigt sich z.B. in zusätzlichen Berechnungen bei Kombinationseinwirkungen (z.B. im DAfStb).

In Tabelle 1 sind Beispiele der namentlich explizit erwähnten Anforderungen an das Nachweis-konzept und die **Detailnachweise** dargestellt. Die Bereiche, in denen vorgegebene numerische Werte in den Regelwerken voneinander abweichen, sind in Tabelle 1 rot hinterlegt.

Tab. 1: Beispiele von Anforderungen innerhalb eines geotechnischen Sicherheitsnachweises für Bauwerkskonstruktionen aus den Richtlinien und Empfehlungen; rot: abweichende numerische Werte, orange: grundlegend in dieser Arbeit sinngemäß einzubeziehende Anforderungen, grau: in der Arbeit zu klärende Übertragbarkeit, EC = Eurocode (DIN EN 1990ff).

	EC	DAfStb	GDA	KTA
A - Anforderung an / mit dem Nachweis der				
Tragfähigkeit	X	X	Stand-sicherheit Beständigkeit Herstellbarkeit	X
Gebrauchstauglichkeit	X			
Dauerhaftigkeit	X			
Zuverlässigkeit	X			
Dichtigkeit		X	X	
Ausschluss von Umfließen		X	X	X
Bemessungssituationen	X	X		X
Grenzzustände	X	X		X
Teilsicherheitsbeiwerte	X	X		X
Kombinationsbeiwerte	X	X		X
Beurteilung nach Schadensfolge	X			X
Schädigungstiefe		X		
Eindringtiefe		X		
Rissbreiten		X		X
Biegezugfestigkeit	X	X		
Beaufschlagungsdauer für Dichtigkeit		X		
Einwirkungen	X	X		X
Kombinationsberechnungen	X	X		X
Zeitliche Abhängigkeit	X	X		X
Einbezug vor- und nachfolgender Ein- und Auswirkungen / Mehrfachbelastungen		X	X	
B - Anforderung an den Nachweis spezifizierter Ein- und Auswirkungen				
Allg. physikalische und chemische Einwirkungen	X	X	X	X
Bewegung im Untergrund	X			
Chemische Korrosion / Alterung	X	X	X	X
Last-/ Auflasteinwirkungen	X	X	X	X
Verformung der Bauwerks	X	X		
Verformung / Versagen durch Materialermüdung	X	X		X
Verschiebung des Bauwerks / Lagesicherheit	X			

	EC	DAfStb	GDA	KTA
Festigkeitsversagen	X			X
Verzerrungen	X	X		
Kriechen		X		
Schwinden		X		
Temperatur	X	X	X	X
Temperatur der eingelagerten Abfälle		X		
Schwingungen	X			
Kräfte aus Strömungsvorgängen		X	X	
Feuchtigkeit	X	X		
Inneres Piping	X			
Gasaustritte	X			

Die Festlegung hinsichtlich des Ziels und damit der Grenzwerte und Detailanforderungen innerhalb eines Sicherheitsnachweises ist, wie bereits erwähnt, entscheidend bei einer geotechnischen Bemessung. In diesem Zusammenhang lassen sich in den Regelwerken Unterschiede hinsichtlich der maximalen zulässigen Rissbreiten und der Durchlässigkeit feststellen. Das KTA Regelwerk lässt Rissbreiten von 0,2 bis 4,0 mm zu, während der DAfSTB (2011) eine maximale Rissbreite von $\leq 0,1$ mm fordert. Die Festlegung einer maximalen Rissbreite schlägt sich auch auf die Materialparameter nieder, wodurch möglicherweise eine Problematik bei der Herstellbarkeit auftreten könnte. Ein höheres Sicherheitsniveau würde sich durch eine Rissbreite nach der DAfSTB (2011) ergeben. Diesbezüglich stellt sich die Frage, ob eine langzeitsichere Umsetzbarkeit dieser Forderung überhaupt möglich ist, oder ob eine Verlängerung des Bauwerks unter Einbezug einer erweiterten Korrosionsfront und damit einer Zulässigkeit größerer Rissbreiten nicht auch die zu erzielende Sicherheit bieten könnte. Auch hinsichtlich der geforderten Durchlässigkeit ergeben sich Abweichungen innerhalb der Empfehlungen. So werden Materialien mit einem k_f -Wert $< 10^{-9}$ m/s in den GDA-Empfehlungen als nahezu undurchlässig angesehen, während die Empfehlungen und Literatur zur untertägigen Deponierung eine Durchlässigkeit in Größenordnung des Gebirges fordern, die aufgrund der generell gehobenen Sicherheitsanforderungen auch für ein Streckenverschlussbauwerk in einem Endlager für radioaktive Abfälle angesetzt werden sollte.

Die bisherigen beispielhaften Betrachtungen zeigen, dass letztendlich der Zielgedanke bei einer Bemessung die ausschlaggebenden Überlegungen zu den Anforderungen bestimmt, die an das Bauwerk zu stellen sind. Eine Übertragbarkeit von Vorgehensweisen, Anforderungen und Richtwerten hinsichtlich des Sicherheitsanspruches, besonders in Bezug auf eine langzeitlich wartungsfreie Auslegung, scheint nur teilweise gegeben. Eine sinngemäße Anwendung der Regelwerke führt je nach Bearbeiter zu Unterschieden in den Vorgaben bzw. Anforderungen und damit zu jeweilig unterschiedlichen Bemessungen von ein und demselben Bauwerk. Die Auswirkungen können sich im Design (z.B. Vermeidung von erzwungenen Verzahnungen mit dem Baugrund im BUMWS) oder auch in der Materialverwendung (z.B. Änderung von Materialparametern infolge Rissbreitenbegrenzung, Durchlässigkeit) widerspiegeln.

Aufgrund der angestrebten hohen Ansprüche an das Sicherheitsniveau bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle werden folgende ausgewählte Anforderungen als grundlegend sinnvoll angesehen und daher in das Auslegungskonzeptes dieser Arbeit sinngemäß einbezogen (vgl. Kapitel 4.2.2):

- standortbezogene Auslegung,
- bidirektionale Auslegung,
- Trennung von Dicht- und Tragwirkung,
- wartungsfreie Ausführung,

- langzeitbeständige Baumaterialien,
- sofortige Wirksamkeit gegenüber einem Lösungszutritt,
- Auslegung der Tragfähigkeit und Dichtigkeit bis zum Zeitpunkt, wo durch eine andere geotechnische oder geologische Barriere die Abdichtfunktion übernommen wird,
- Durchlässigkeit in Größenordnung des umgebenden Gebirges,
- drucktechnische Auslegung gegen hydrostatischen Flüssigkeitsdruck (ohne Funktionsverlust; separate Betrachtung der Auswirkungen durch komprimierte Gase),
- Einbeziehung der in Tabelle 1 orange hinterlegten Detailanforderungen nach DAfStb, DIN EN 1990ff und GDA.

Aufgrund der hier dargestellten Situation und wegen der sicherheitstechnischen Bedeutung von Abdichtbauwerken erscheint die Entwicklung einer Leitlinie zu Anforderungen an die Bemessung und Errichtung sowie an die diesbezüglichen Nachweise angebracht. Ausgangspunkt können die o.g. Anforderungen sein.

Eine Anwendung des KTA-Regelwerkes wird für die Auslegung eines geotechnischen Verschlussbauwerks in einem Endlager für radioaktive Abfälle als nicht sinnvoll erachtet (siehe oben). Einzig die erhöhte Anforderung an den Nachweis der oberen charakteristischen Werte innerhalb eines 98 % Fraktils lässt einen Einbezug des Regelwerks möglich erscheinen, wobei die Umsetzung dieser Forderung fraglich bleibt (Kapitel 9).

Ungeachtet der Fragen nach der Übertragbarkeit von Auslegungs- und Detailanforderungen bei einer sinngemäßen Anwendung unterliegen geotechnische Sicherheitsnachweise für untertägige Bauwerkskonstruktionen je nach gesetzlicher und normativer Zuordnung der Forderung nach Anwendung der „Allgemein anerkannten Regeln der Technik“, des „Standes der Technik“ sowie des „Standes von Wissenschaft und Technik“. Diese aufeinander aufgebauten Begriffe der sogenannten Dreistufentheorie definieren den Qualitätsmaßstab, der an den Inhalt und den Umfang der Sicherheitsnachweise gestellt wird (DÜSTERLOH 2009). Bei den „allgemein anerkannten Regeln der Technik“ wird auf die vorherrschende Auffassung der Mehrheit von Fachleuten zurückgegriffen (BVERFGE 1978). Dadurch wird der gängige Standard hinsichtlich technischer Anwendungen und deren langfristiger Bewährung als ausreichend angesehen. Dies ist zwar notwendig, erfüllt aber nicht die Anforderungen an die Sorgfaltspflicht hinsichtlich Gefahrenabwehr und Risikovorsorge. Deshalb werden die „Allgemein anerkannten Regeln der Technik“ um den Einbezug der technischen Entwicklung erweitert und spiegeln damit die Anforderungen nach dem „Stand der Technik“ wider (BVERFGE 1978). Wesentlicher Unterschied ist, dass ein Vorgehen nach dem Stand der Technik zwar technisch erprobt, sich aber noch nicht langfristig bewährt haben muss (DÜSTERLOH 2009). Die höchste Anforderungsstufe ist durch die Anwendung nach dem „Stand von Wissenschaft und Technik“ gegeben. Dabei „muss diejenige Vorsorge gegen Schäden getroffen werden, die nach den neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen für erforderlich gehalten wird [...] Lässt sie sich technisch noch nicht verwirklichen, darf die Genehmigung nicht erteilt werden; die erforderliche Vorsorge wird mithin nicht durch das technisch gegenwärtig Machbare begrenzt“ (BVERFGE 1978 S. 89).

Ein Vergleich der hier aufgeführten übergeordneten Gesetzestexte bezüglich der Genehmigung einer Anlage im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens zeigt Unterschiede hinsichtlich dieser Qualitätsanforderung auf. Das Atomgesetz fordert nach § 7 Abs. 2 Nr. 3 AtG (2012): „Die Genehmigung darf nur erteilt werden, wenn die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderliche Vorsorge gegen Schäden durch die Errichtung und den Betrieb der Anlage getroffen ist“. Das für eine Genehmigung erforderlich anzuwendende UVPG verlangt nach §21 Abs. 1 Nr. 1b UVPG (2013) jedoch nur, dass ein Planfeststellungsbeschluss ergehen darf, wenn „Vorsorge

gegen die Beeinträchtigung der Schutzgüter, insbesondere durch bauliche, betriebliche oder organisatorische Maßnahmen entsprechend dem Stand der Technik getroffen wird“. Für die neben dem Planfeststellungsverfahren zusätzliche Genehmigung im bergrechtlichen Verwaltungsverfahren ist gemäß §55 Abs.1 Nr. 5 BBERG (2009) die Zulassung eines Betriebsplanes zu erteilen, wenn „die erforderliche Vorsorge gegen Gefahren für Leben, Gesundheit und zum Schutz von Sachgütern, Beschäftigter und Dritter im Betrieb, insbesondere durch die den allgemein anerkannten Regeln der Sicherheitstechnik entsprechenden Maßnahmen [...] getroffen ist“. Hinsichtlich der Errichtung einer untertägigen Anlage wird allerdings gefordert, dass Prüfungen oder Abnahmen in ihrer Ausstattung dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen müssen (§138 Abs. 138 Nr. 1 BBERG 2009).

Bei den Empfehlungen, die die Grundlage für die Herangehensweise und Umsetzbarkeit geotechnischer Sicherheitsnachweise bilden, lassen sich ebenso wie bei den Gesetzestexten Unterschiede hinsichtlich dieser Thematik feststellen. So stellen Empfehlungen, die sich ihrerseits auf das AtG berufen, auch wie dieses den Anspruch an den Stand von Wissenschaft und Technik (KTA-Regelwerk, BMU-Empfehlung). In den KTA SICHERHEITSGRUNDLAGEN (2011 Abschnitt 1.1) heißt es, das „Lücken im Regelwerk [...] nach dem Stand von Wissenschaft und Technik geschlossen und neuere Entwicklungen berücksichtigt [werden]“. Gemäß den BMU-Empfehlungen (2010) muss die Schadensvorsorge gemäß AtG dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen. Im Gegensatz zu den Empfehlungen der KTA und des BMUs formulieren die Empfehlungen der DIN EN 1990ff und der GDA ihre Anforderungen nach dem Stand der Technik. Demnach wird bei den Festlegungen der allgemeinen Anforderungen vorausgesetzt, „dass der Entwurf und die Berechnung nach dem anerkannten Stand der Technik mit der für das Projekt erforderlichen Sorgfalt durchgeführt werden“ (DIN EN 1990 2010 Abschnitt 2.1 Nr. 7), und mit den „GDA-Empfehlungen [...in...] Regelwerk [...] nach dem Stand der Technik zur Verfügung steht“ (GDA 1997 S.XII).

Angesichts der unterschiedlichen Maßstäbe in den Anforderungen für eine Genehmigung ein und derselben Anlage stellt sich somit die Frage nach der Vereinbarkeit der Forderungen aus verschiedenen Gesetzes- und Empfehlungstexten. Das AtG setzt durch die übergeordnete und damit ausschlaggebende Forderung nach dem „Stand von Wissenschaft und Technik“ fest. Allerdings können die Empfehlungen für geotechnische Bemessung nur den Stand der Technik umfassen, da sie das derzeitige umsetzbare Wissen von Experten widerspiegeln und für die grundsätzliche Anwendung erstellt wurden. Da bei einer Genehmigung, die auf der Forderung nach dem „Stand von Wissenschaft und Technik“ basiert, eine Darstellung, die ausschließlich auf der Umsetzbarkeit und damit dem Stand der Technik aufbaut, nicht ausreichend ist (BVERFGE 1978), muss diese Diskrepanz bereits bei der Planung und dem Entwurf geotechnischer Bauwerke durch die fortlaufende Entwicklung wissenschaftlicher Aspekte ausgeglichen werden. Eine bei der Planung und dem Entwurf einbezogene Umsetzung der Forderung nach dem „Stand von Wissenschaft und Technik“ entspricht der Sorgfaltspflicht nach einem hohen Sicherheitsniveau. Gerade im Bereich geotechnischer Verschlussbauwerke in einem Endlager für (hoch)radioaktive Abfälle ist ein solcher Ansatz notwendig.

5 Rahmenkonzept für Bemessung und Nachweisführung

Die Vorgehensweisen, Konzepte und Nachweise der ingenieurtechnischen Bauwerksauslegung und die für die Langzeitsicherheit eines Endlagers für radioaktive Abfälle beruhen auf unterschiedlichen Zielsetzungen (Kapitel 3 und 4). Insbesondere die den normativen Regelwerken zugrundeliegende zeitliche Begrenzung der Nutzungszeit bzw. Lebensdauer (100 Jahre) und die Spezifizierung auf die Betriebsphase (Möglichkeit zur Ausbesserung) bewirkt eine Diskrepanz zwischen der ingenieurtechnischen Vorgehensweise und den Anforderungsgrundlagen der Langzeitsicherheit. Angesichts der konstitutiven Umsetzbarkeit sollten die normativen Vorgehensweisen als Basis angesehen werden. Durch die Ermittlung der für die Langzeitsicherheit ausschlaggebenden Kriterien könnten die Grundsätze der Langzeitsicherheitsanforderungen in die konzeptionelle Auslegung für Abdichtungsbauwerke einbezogen werden. Zur Klärung der Frage, ob die Auslegungsmethodik für ein geotechnisches Bauwerk auf die für ein geotechnisches Verschlussbauwerk in einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle unverändert übernommen werden kann bzw. an welchen Stellen Änderungs- bzw. Ergänzungsbedarf besteht, wurde ein Konzeptansatz entwickelt, der die langzeitsicherheitsrelevanten Anforderungen in die derzeit gültigen ingenieurtechnischen Vorgaben integriert.

Das Konzept gliedert sich in fünf Vorgehensschritte (vgl. Abb. 13):

- Schritt 1: Separate Betrachtung der Anforderungen aus dem Sicherheitskonzept für die Langzeitsicherheit und der ingenieurtechnischen Vorgaben aus den normativen Regelwerken an eine Auslegung für ein geotechnisches Abdichtungsbauwerk. Dadurch werden die FEP-Einwirkungen, die die Anforderungen an eine langzeit-sichere Bauwerksauslegung beschreiben, und die zu prüfenden Eigenschaften für das jeweilige geotechnische Bauwerk identifiziert. Je nach Zielsetzung (Vorbemessung und Bemessung) erfolgt eine Auswahl der langfristig einzubeziehenden Aspekte hinsichtlich Zeit, Relevanz und entsprechend der Anforderungen.
- Schritt 2: Abgleich der Anforderungen aus der Langzeitsicherheit an ein geotechnisches Barrierebauwerk mit den ingenieurtechnischen Vorgaben an die Auslegung von Abdichtungsbauwerken auf der Basis ausgewählter relevanter FEP für eine Vorbemessung bzw. Bemessung aus den in Schritt 1 identifizierter FEP-Einwirkungen. Durch die Einschätzungen möglicher weitreichender Einwirkungen und Auswirkungen werden ggf. zusätzliche Anforderungen und Nachweiskriterien abgeleitet.
- Schritt 3: Ingenieurtechnische Planung des Verschlussbauwerks, in der die Auslegung mit der Prüfung der festgelegten Anforderungswerte im ingenieurtechnischen Sicherheitsnachweis erfolgt (erster Iterationskreislauf).
- Schritt 4: Erweiterte Funktionsprüfung und -bewertung unter Einbezug aller in Schritt 1 identifizierten FEP, der daraus resultierenden Szenarien und der Betrachtung des Verschlussbauwerks im Gesamtsystem (Mehrbarrierensystem). Daraus werden Aussagen über den Nachweis der Langzeitsicherheit und ggf. Formulierungen von Anforderungen zur Nachbesserung der Auslegung abgeleitet (zweiter Iterationskreislauf mit Schritt 4a zurück auf Schritt 3 oder mit Schritt 4b zur Änderung der Anforderungen an die Barriere und damit des Endlagerkonzeptes)
- Schritt 5: Sicherheitsdokumentation der erzielten Ergebnisse und Nachweise als Grundlagendokument für das Planfeststellungs- bzw. Genehmigungsverfahren.

Abb. 13 zeigt das entwickelte Rahmenkonzept für die Bemessung und Nachweisführung eines geotechnischen Verschlussbauwerks und veranschaulicht die Zusammenführung der zunächst separaten Betrachtung der Anforderungen aus dem Sicherheitskonzept der Langzeitsicherheit und den zu prüfenden Eigenschaften für Abdichtungsbauwerke aus den gesetzlichen und normativen Regelwerken. Auf einen Einbezug von Gesetzestexten in Abb. 13 wurde an dieser Stelle verzichtet, da sie bis auf die Festlegung von Dosiswerten über die Freisetzung radioaktiver Stoffe keine spezifischen Anforderungen an eine Auslegung für Abdichtungsbauwerke enthalten. Aus den Anforderungen hinsichtlich der Langzeitsicherheit ergeben sich korrespondierende Anforderungen an die Permeabilität und/oder an die Sorptionsfähigkeit, die bei der Überprüfung der festgelegten Anforderungswerte innerhalb des ingenieurtechnischen Sicherheitsnachweises berücksichtigt werden.

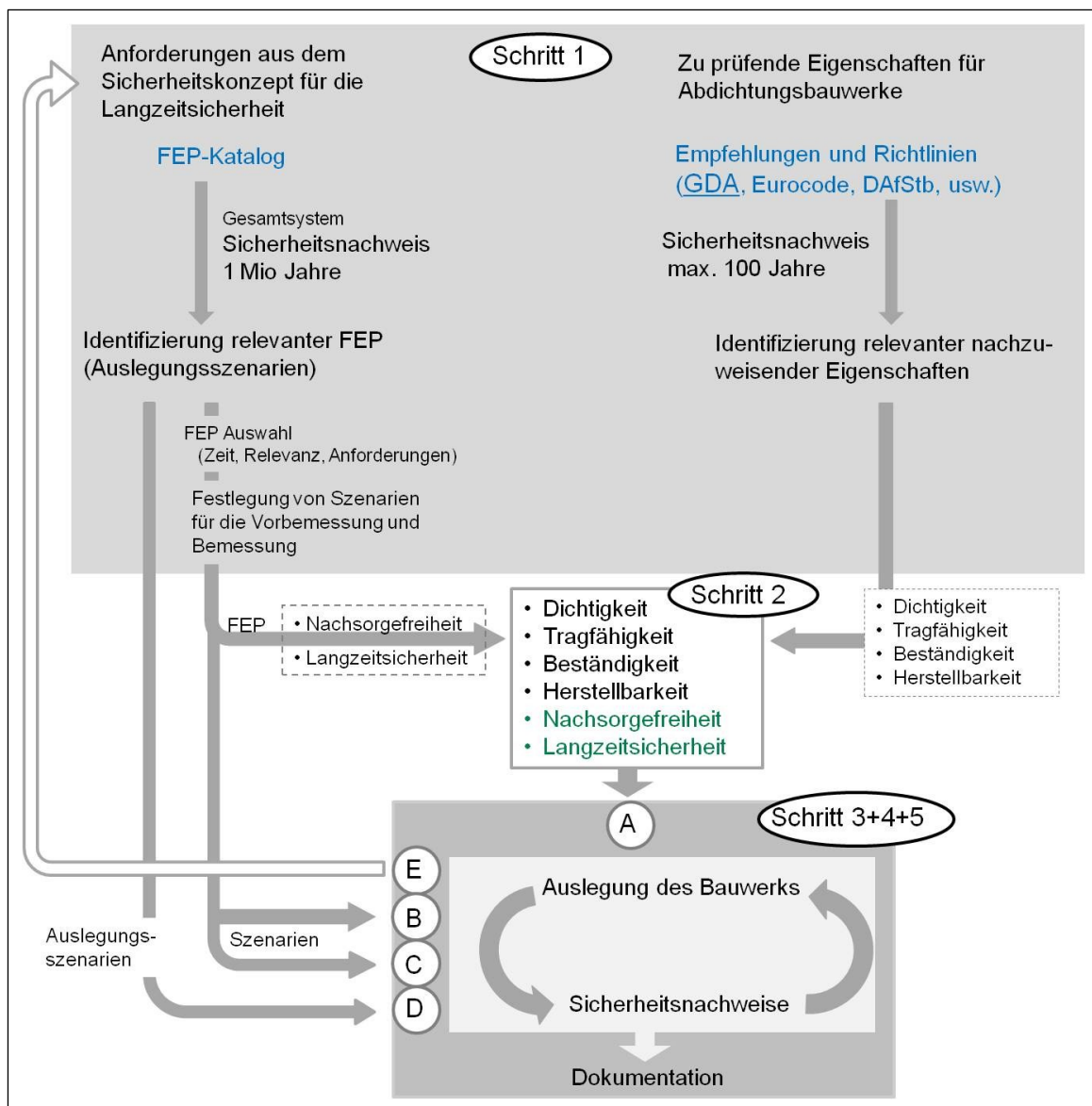


Abb. 13: Konzept für die Bemessung und Nachweisführung eines geotechnischen Verschlussbauwerks
 Blau: Grundbausteine für den LSN und die derzeit gültige ingenieurtechnische Auslegung; Grün: zusätzliche Anforderungen aus der Langzeitsicherheit an die ingenieurtechnische Auslegung.
 Die Buchstaben A bis D beziehen sich auf die weiterführende Betrachtung in Abb. 14.

Bevor die Anforderungen aus den Langzeitsicherheitsbetrachtungen in die ingenieurtechnische Auslegung einfließen können, sollten vorerst beide Vorgehens- und Betrachtungsweisen separat

betrachtet werden (**Schritt 1** in Abb. 13). Dies legt die spezifischen Kriterien aus beiden Ansätzen für das jeweilige Bauwerkskonstrukt fest. Erst wenn diese Kriterien identifiziert worden sind, können die Kriterien, deren zusätzliche Einhaltung für die Langzeitsicherheit gefordert werden, in die ingenieurtechnischen Auslegungsvorgaben eines geotechnischen Abdichtungsbauwerkes integriert werden.

Grundlage für die zu prüfenden Eigenschaften eines Streckenverschlussbauwerks sind die in Kapitel 3 aufgeführten Richtlinien und Empfehlungen. Da es keine direkt anwendbare Normung für geotechnische Bauwerke in HLW-Endlagern gibt, ist es notwendig, aus den vorhandenen Normen, Richtlinien und Empfehlungen sämtliche für ein untertägiges Verschlussbauwerk mögliche und relevante Prüfeigenschaften genauer zu betrachten (siehe Kapitel 4.2.2). Die GDA-Empfehlungen führen für die Sicherheitsbetrachtung bei Abdichtungsbauwerken vier Anforderungen auf: Dichtigkeit, Tragfähigkeit (Standicherheit), Beständigkeit und Herstellbarkeit. Da sich diese vier Prüfaspunkte auch in anderer Literatur – wie z.B. dem Eurocode – wiederfinden, werden sie als Basis für den ingenieurtechnischen Ansatz gewählt. Dabei werden sowohl die Prüfanforderungen und -nachweise aus dem Eurocode und der DAfStb-Richtlinie zusammengeführt als auch die Prüfeigenschaften im Falle einer semiprobabilistischen Vorgehensweise für die Zuverlässigkeitsbewertung durch die Änderung der charakteristischen Werte ggf. nach den Anforderungen der KTA verändert (siehe Kapitel 4.2.3).

Der Grundbaustein für den Langzeitsicherheitsnachweis ist der FEP-Katalog (z.B. BUHMANN ET AL. 2010A¹⁰). Der genannte Katalog umfasst eine Zusammenstellung aller Merkmale, Ereignisse und Prozesse (FEP – features, events, processes), die für eine Endlagerung hochradioaktiver Stoffe in einem Salzstock in der norddeutschen Tiefebene als relevant angesehen werden können, und gibt eine Darstellung der wesentlichen Aspekte zu den Ereignissen und Prozessen, die in einem derartigen Endlagersystem ablaufen können (BUHMANN ET AL. 2010A). Die FEP aus dem FEP-Katalog dienen als Grundlage für die Erstellung von Szenarien im Langzeitsicherheitsnachweis. In den in der VSG abgeleiteten Szenarien werden entweder die möglichst große Gesamtheit als wahrscheinlich anzusehender Entwicklungen des Endlagersystems (Referenzszenarium), oder die weniger wahrscheinlichen bzw. die im Referenzszenarium nicht erfassten wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagersystems (Alternativszenarium) beschrieben (BEUTH ET AL. 2012).

Ausgangspunkt zur Ermittlung auslegungsbestimmender Kriterien seitens der Langzeitsicherheit ist zunächst die FEP-Identifizierung auf der Grundlage eines Referenzszenariums. Allerdings stellte sich heraus, dass die für eine Auslegung relevanten FEP unter Umständen nicht Teil des Referenzszenariums sind. So wird beispielsweise bei der ingenieurtechnischen Auslegung eines Bauwerkes stets zum Nachweis der „hydromechanischen Widerstandsfähigkeit“ ein einseitiger Druck einer vollständig anstehenden Flüssigkeitssäule angenommen. Das Anstehen einer Flüssigkeitssäule ist für einen Streckenverschluss allerdings Teil eines Alternativszenariums, in dem ein Versagen eines Schachtverschlusses als wenig wahrscheinlich eingestuft wird. In diesem Alternativszenarium können sich durch ein erhöhtes Lösungsaufkommen einerseits einige FEP-Einwirkungen selbst und damit auch deren Auswirkungen auf das Bauwerk verstärken (Ausfällung/Auflösung), andererseits das zeitliche Auftreten dieser Ein- bzw. Auswirkungen verändern. Durch dieses Beispiel wird deutlich, dass die Betrachtung eines Referenzszenariums für den hier verfolgten Ansatz einer Bauwerksauslegung hinsichtlich der geforderten Langzeitsicherheit nicht ausreichend ist. Deshalb werden für das hier entwickelte Rahmenkonzept vorerst alle FEP bestimmt, die im Zeitraum der Betriebs- und Nachverschlussphase mit einem Streckenverschlussbauwerk in Verbindung gebracht werden können (Ziel ist die Ableitung von Auslegungsszenarien).

¹⁰ 2012 wurde dieser FEP-Katalog im Rahmen der VSG überarbeitet. Dabei wurden FEP verschoben, separiert, entfernt oder neu hinzugefügt. Da die durchgeführten Änderungen im Zusammenhang mit dieser Arbeit nicht ausschlaggebend sind und aufgrund dessen, dass diesem Katalog die Eigenschaft eines „lebenden Dokumentes“ zugrundeliegt, das immer einer ständigen Erneuerung unterliegt, wird zur Veranschaulichung der Vorgehensweise des Konzeptes auf den FEP-Katalog von BUHMANN ET AL. (2010A) verwiesen.

Die durch diese Vorgehensweise ermittelten FEP und die damit zusammenhängenden Szenarien werden innerhalb des erweiterten Funktionsnachweises (Schritt 4) betrachtet. Je nach Zielsetzung (Vorbemessung, Bemessung) erfolgt aus den FEP für die Auslegungsszenarien mittels Szenarienanalyse die Auswahl der relevanten FEP, die für eine Auslegung des Verschlussbauwerks hinsichtlich der Funktionsdauer, der Relevanz und entsprechend der langzeitsicheren Anforderungen als abdeckend angesehen werden. Dabei werden mögliche FEP-basierte Einwirkungen auf eine geotechnische Barriere identifiziert und beschrieben, die für eine zuverlässige Beurteilung der Sicherheit (Tragfähigkeit und Funktionsfähigkeit) der Barriere während der Errichtung des Bauwerks als auch der Betriebsphase, Stilllegung und Nachbetriebsphase des Endlagers relevant sind (Szenarien der Vor- und Bemessung). Dies beinhaltet eine Auswahl von FEP, die mit ihren Ausprägungen, Interaktionen und Zeitverläufen bei der Auslegung einer geotechnischen Barriere für den betrachteten Zeitraum zu berücksichtigen sind. Zur Gewährleistung der dem Verschlussbauwerk im Endlagerkonzept zugewiesenen Sicherheitsfunktionen müssen in diesem Zusammenhang auch die FEP-basierten Einwirkungen betrachtet werden, die für das Bauwerk funktionsrelevante Auswirkungen besitzen. Dafür werden ebenfalls FEP mit geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten einbezogen, um deren Auswirkungsgrad auf die Barriere zu testen. Die Einbeziehung derartiger FEP kann in Form von „What-if“-Szenarien u.a. zur Demonstration der Wirksamkeit von Einzelkomponenten erfolgen.

Das Ziel bei einer langzeitlichen Auslegung einer geotechnischen Barriere ist, den Erhalt der Sicherheitsfunktion(en) über einen festgelegten Zeitraum zu gewährleisten. Deshalb werden im **Schritt 2** des Rahmenkonzeptes die FEP, die aus den Auslegungsszenarien für die Szenarien der Vorbemessung und Bemessung unter Berücksichtigung der Sicherheitsfunktion und der festgelegten Lebensdauer bereits in Schritt eins separiert und auf ihre Relevanz überprüft wurden, mit den bereits bestehenden ingenieurtechnischen Anforderungen – in diesem Konzeptansatz mit den zu prüfenden Eigenschaften der GDA-Empfehlungen – abgeglichen. Die jeweils ermittelten FEP-basierten Einwirkungen der Vorbemessung oder Bemessung bedingen die Anforderungen an das Verschlussbauwerk. Der Abgleich zeigt, ob bereits vorhandene Kriterien verändert werden müssen oder komplett neue Anforderungen an das Bauwerk resultieren. Damit bestimmen die ingenieurtechnischen und die langzeitsicherheitsrelevanten Anforderungen die Auslegung des Bauwerks.

Innerhalb der Bemessung und Nachweisführung spielt die Festlegung des Nutzungszeitraumes im Hinblick auf die Erhaltung der Integrität geotechnischer Bauwerke eine wichtige Rolle. Derzeit gültige Normen und Richtlinien beruhen auf Erfahrungen aus der bautechnischen Praxis und ermöglichen eine ingenieurtechnische Auslegung von Bauwerken mit einer Lebensdauer bis zu 100 Jahren. Für diese Bauwerke wird bei der Nachweisführung die Möglichkeit der Ausbesserung einbezogen. Dem gegenüber steht die Anforderung aus dem Langzeitsicherheitsnachweis, eine nachsorgefreie Sicherheit des Gesamtsystems über einen Zeitraum von einer Million Jahre nachzuweisen, wobei der Nachweiszeitraum der geotechnischen Barrieren als ein Teilsystem weit unterhalb dieser Zeitspanne liegt (siehe Kapitel 6 Lebensdauer). Dennoch ist in der Nachverschlussphase weder eine Möglichkeit der Ausbesserung der geotechnischen Barrieren vorgesehen noch sinnvoll umsetzbar. Somit müssen die zusätzlichen Anforderungen der Langzeitsicherheit und der Nachsorgefreiheit mit den ingenieurtechnischen Anforderungen an die Auslegung der technischen Bauwerke (Dichtigkeit, Tragfähigkeit, Beständigkeit, Herstellbarkeit) zusammengeführt werden. Dies umfasst eine Betrachtung der Prüfkriterien an ein geotechnisches Verschlussbauwerk und deren Beeinflussungen durch langzeitliche Einwirkungen, als auch eine Zuordnung und ein Abgleich der langzeitrelevanten Einwirkungen mit den zu prüfenden Eigenschaften für Abdichtungsbauwerke.

Nachdem die ingenieurtechnischen Prüfkriterien um die Aspekte aus der Langzeitsicherheit erweitert wurden, folgt die Auslegung des Verschlussbauwerks einschließlich der Sicherheitsnachweise und die Dokumentation der Ergebnisse. Dieser Ablauf ist im unteren Bereich der Abb. 13 schematisch dargestellt. Eine detailliertere Darstellung für Schritt 3 bis 5 erfolgt in Abb. 14.

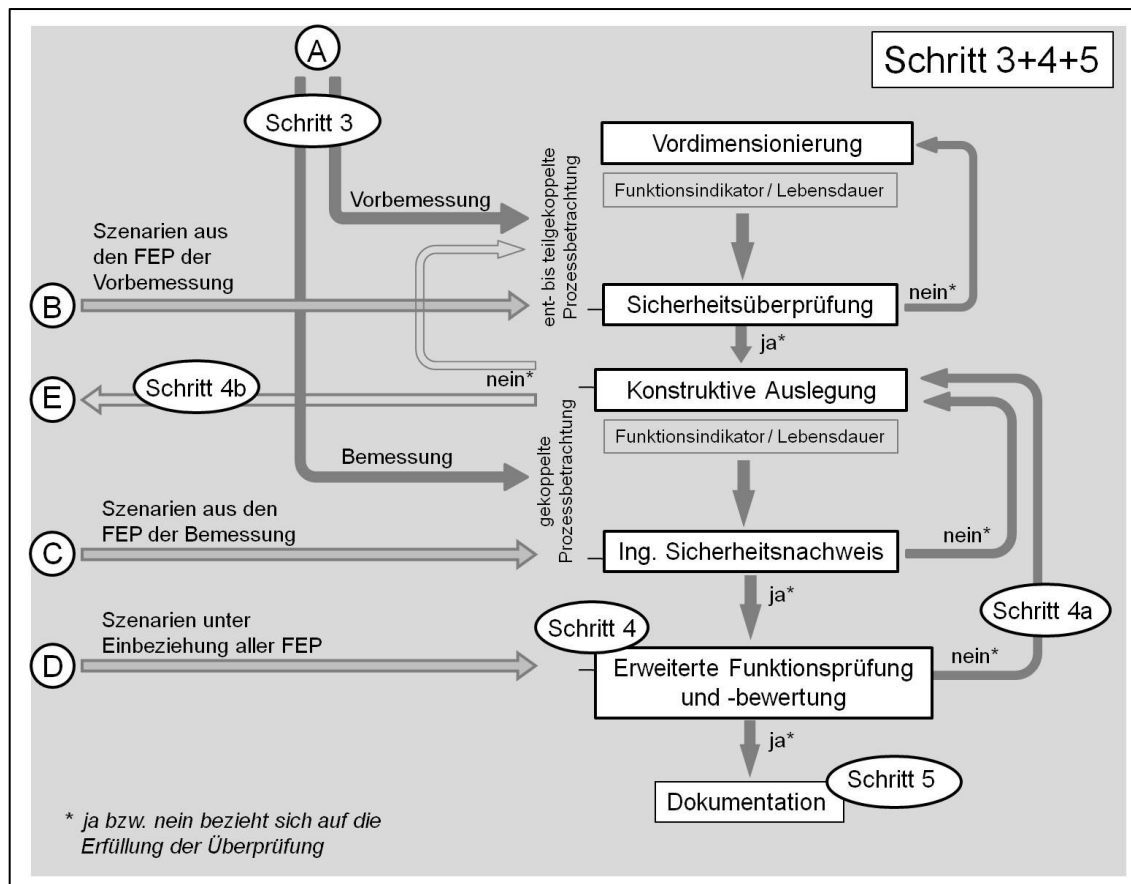


Abb. 14: Integration der ausgewählten FEP in die ingenieurtechnische Auslegung eines geotechnischen Verschlussbauwerks; Abkürzungen: Ing.=Ingenieurtechnischer. Die Buchstaben A bis D beziehen sich auf die Betrachtung in Abb. 13.

Nachdem die langzeitrelevanten Anforderungen in die ingenieurtechnischen Anforderungen je nach Zielsetzung (Vorbemessung, Bemessung) integriert und der jeweilige Einfluss langzeitlicher Ein- und Auswirkungen auf die Nachweiskriterien aufgezeigt wurden, folgt im **Schritt 3** des Rahmenkonzeptes die Auslegung des Verschlussbauwerks im ingenieurtechnischen Planungsprozess. Die Auslegung eines Abdichtungsbauwerks für längere Zeiträume erfolgt im Hinblick auf die Funktionsindikatoren (z.B. effektive Permeabilität, Korrosionsrate, Spannungen) und die erforderliche Lebensdauer (Kapitel 6) und sollte je nach Zielsetzung eine teilgekoppelte Prozessbetrachtung (Vorbemessung) bzw. eine gekoppelte Prozessbetrachtung (Bemessung) hinsichtlich der Kombinationen langzeitrelevanter Einwirkungen und deren Auswirkungen einbeziehen. Die Berücksichtigung der durch die Kombinationen hervorgerufenen Intensivierungen oder Abschwächungen ermöglicht eine Verringerung der Iterationsschritte im Rahmenkonzept und führt zu einer realitätsnäheren Auslegung. Innerhalb der Sicherheitsüberprüfung (Vorbemessung) und des ingenieurtechnischen Sicherheitsnachweises (Bemessung) werden die Anforderungswerte iterativ geprüft und ggf. verändert, um sich an eine optimale konstruktive Auslegung anzunähern und die Einhaltung der Grenzwerte zu gewährleisten. Bei den Grenzwerten handelt es sich um vorgeschriebene Grenzwerte (z.B. einzuhaltende Dosiswerte), die während der gesamten Lebensdauer der geotechnischen Barriere nicht überschritten werden dürfen. Anforderungswerte

beschreiben materialspezifische und konstruktionsbedingte Grenzwerte, die dem derzeitigen Stand der Technik und der derzeitigen bautechnischen Vorgehensweise entsprechen. Sie beziehen sich auf die Anforderungen, die an die Materialparameter und die konstruktive Auslegung des Verschlussbauwerks gestellt werden und spiegeln damit die Zuverlässigkeit des Teilsystems wider. Bei der Bestimmung von Anforderungswerten spielt auch die Länge des geforderten Nachweiszeitraums eine wichtige Rolle. So zeigt sich beispielsweise, dass ein nach dem Eurocode gefordertes Sicherheitsniveau von 95 % auf 100 Jahre nach 1.000 Jahren nur noch bei ca. 40 % liegt (Kapitel 10). Die Langzeitsicherheit fordert aber einen Nachweis des anfänglichen Sicherheitsniveaus während der gesamten Lebensdauer. Damit das auslegungsrelevante Zuverlässigkeitsniveau für die längere Lebensdauer und für die in dieser Zeit möglicherweise auftretenden Einwirkungen mit gleichzeitigem Korrosionsfortschritt im Bauwerks gewährleistet wird, müssen die Anforderungen an die konstruktive Auslegung und die eingesetzten Materialien angepasst werden. Dies äußert sich in einer Änderung der Materialkennwerte oder in einer konzeptionellen Änderung des konstruktiven Aufbaus.

Innerhalb des ingenieurtechnischen Planungsprozesses wird das Abdichtungsbauwerk zunächst auf Grundlage der während der Vorplanung festgelegten überschlägigen Vorbemessungsparameter vordimensioniert. Aus den in Schritt 2 für eine Vorbemessung festgelegten Anforderungen und Nachweiskriterien werden Indikatoren abgeleitet, für die die Einhaltung der Anforderungswerte im Zusammenhang mit den auftretenden langzeitlichen Einwirkungen im Rahmen der Sicherheitsüberprüfung geprüft wird. Dabei können überschlägige Annahmen bei den Einwirkungen (Lastfälle), Widerständen (Material) und geometrischen Abmessungen angenommen und mittels vereinfachter Modelle betrachtet werden. Aufgrund der nach dem Stand der Technik anerkannten vereinfachten Vorgehensweise erfolgt aus Gründen der Handhabbarkeit eine Einzelbetrachtung der Einwirkungen oder eine vereinfachte Betrachtung von ausgewählten Kopplungen (ent- bis teilgekoppelte Prozessbetrachtung). Bei der teilgekoppelten Prozessbetrachtung werden die Szenarien aus den ausgewählten FEP der Vorbemessung aus Schritt 2 des Rahmenkonzeptes einbezogen, wodurch mögliche Verstärkungen der Einwirkungsintensitäten berücksichtigt werden. Wird innerhalb der Sicherheitsüberprüfung festgestellt, dass die Höhe der Einwirkungen den Anforderungswert überschreitet, muss der Anforderungswert verändert und die Herstellbarkeit überprüft werden. Kann bei der Sicherheitsprüfung nachgewiesen werden, dass die Höhe der Einwirkungen unterhalb des Anforderungswerts liegt, wird der nächste Indikator betrachtet. Durch dieses Vorgehen erfolgt eine erste iterative Annäherung an die erforderliche Widerstandsfähigkeit auf der Basis materialspezifischer Anforderungswerte.

Nachdem die für die Auslegung bestimmenden Indikatoren und damit die Anforderungswerte im Rahmen der Vorbemessung überschlägig geprüft wurden, werden sie im Zuge der Bemessung verifiziert. Aufbauend aus den Ergebnissen der Vorbemessung erfolgt die konstruktive Auslegung des Verschlussbauwerks, welche bezugnehmend auf die in Schritt 2 für eine Bemessung abgeleiteten Anforderungen und Nachweiskriterien innerhalb des ingenieurtechnischen Sicherheitsnachweises geprüft wird. Im Gegensatz zur ent- bis teilgekoppelten Prozessbetrachtung während der Sicherheitsüberprüfung der Vorbemessung wird bei der Bemessung eine vollständig gekoppelte Prozessbetrachtung unter Einbezug der Szenarien aus den ausgewählten FEP für eine Bemessung durchgeführt (FEP-Auswahl siehe Kapitel 7 und Anhang D). In diesem Zusammenhang erfolgt eine umfassende Überprüfung des Ein- und Auswirkungsgrades kombinierter langzeitlicher Einwirkungen auf das Abdichtungsbauwerk. Ergibt sich aus dem ingenieurtechnischen Sicherheitsnachweis, dass ein Anforderungswert für die Gewährleistung der Sicherheitsfunktion nicht ausreichend ist, erfolgt wie bei der Vorbemessung eine Veränderung des Wertes und eine Überprüfung der Herstellbarkeit. Ist eine Änderung des Anforderungswertes z.B. durch eine Veränderung der Mischungsverhältnisse der eingesetzten Materialien oder gering abweichende konstruktionsspezifische Überarbeitungen im Design umsetzbar, wird die konstruktive Auslegung

dementsprechend verändert und es erfolgt eine erneute Prüfung aller Indikatoren im ingenieurtechnischen Sicherheitsnachweis. Ergibt sich aus den Ergebnissen des ingenieurtechnischen Sicherheitsnachweises die Notwendigkeit fundamentaler Neuerungen – z.B. Einsatz anderer Baumaterialien oder weitreichende konstruktionsspezifische Änderungen – erfolgt eine Neudimensionierung des Verschlussbauwerks, für die abermals eine Vorbemessung erfolgt und erneut der Kreislauf innerhalb des ingenieurtechnischen Planungsprozesses beginnt. Durch diese Vorgehensweise wird sich Schritt für Schritt der optimalen Umsetzung genähert (Iteration). Sollte sich darauf aufbauend keine Umsetzung der Anforderungen innerhalb der Auslegung des Verschlussbauwerks ergeben, muss bereits an dieser Stelle zu Schritt 4b des Rahmenkonzeptes übergegangen werden.

Wird im ingenieurtechnischen Sicherheitsnachweis festgestellt, dass die Einhaltung der langzeitlichen Sicherheitsanforderungen durch die konstruktive Auslegung des Bauwerks gewährleistet ist, erfolgt in **Schritt 4** des Rahmenkonzeptes eine erweiterte Funktionsprüfung und -bewertung des Verschlussbauwerks. Die Grundsätze der erweiterten Funktionsprüfung und -bewertung bilden einerseits die Analyse der zu beachtenden Gefährdungsmöglichkeiten während Errichtung, Betrieb und Nachbetriebsphase, und andererseits der Nachweis, dass es während der erforderlichen Lebensdauer der geotechnischen Barriere zu keiner Beeinträchtigung der Biosphäre kommen kann. Dieser Teilschritt des Rahmenkonzeptes entspricht der konventionellen Vorgehensweise der Langzeitsicherheitsanalyse, also einer Analyse des gesamten Endlagersystems. Dabei wird die Funktionalität des ausgelegten Verschlussbauwerks unter Einbezug aller Aspekte der Langzeitsicherheitsbetrachtung mit Hilfe der Szenarienanalyse, Simulationen und ggf. Modellierungen hinsichtlich der Gewährleistung der dem Sicherheitskonzept entsprechenden Sicherheitsfunktionen innerhalb der festgelegten Lebensdauer des Bauwerks erneut geprüft und bewertet. Während sich bei der erweiterten Überprüfung der Funktionalität unter Berücksichtigung aller für das Verschlussbauwerk identifizierten FEP, deren Interaktionen, Auswirkungen und Unsicherheiten (Schritt 1, Auslegungsszenarien) auf das Teilsystem geotechnische Barriere bezogen wird, erfolgt nun die Bewertung der Funktionalität innerhalb des Gesamtsystems (Mehrbarriersystem). Durch die Betrachtung sämtlicher langfristig relevanter FEP wird auch die an den jeweiligen Bearbeiter gebundene subjektive Festlegung bei der Identifikation der für die (Vor-) Bemessung relevanten FEP ausgeglichen.

Wird innerhalb der erweiterten Funktionsprüfung und -bewertung festgestellt, dass keine hinreichende Funktionsfähigkeit des Verschlussbauwerks während seiner gesamten Lebensdauer und damit eine Verletzung des Sicherheitsanspruches vorliegt, werden dementsprechende Anforderungen zur Nachbesserung der Auslegung des Verschlussbauwerks formuliert (zweiter Iterationskreislauf). Ergibt sich demnach aus der erweiterten Funktionsprüfung und -bewertung, dass die im ingenieurtechnischen Planungsprozess geschlussfolgerten Anforderungswerte bei einer möglichen Verstärkung der Einwirkungsintensität aus den Interaktionen der FEP innerhalb der Auslegungsszenarien überschritten werden, oder dass aus den Ergebnissen der Systemanalyse abgeleitet wird, dass die Sicherheitsfunktionen nicht ausreichend gewährleistet werden können, muss das Auslegungskonzept so verändert werden, dass durch eine Modifizierung der Anforderungswerte oder durch eine Änderung der konstruktiven Dimensionierung die Sicherheitsfunktionen gewährleistet werden können (**Schritt 4a**). Sind die Anforderungen aus der erweiterten Funktionsprüfung und -bewertung umsetzbar, wird die konstruktive Auslegung im Hinblick auf die modifizierte Anforderungswertsetzung oder die konzeptionellen Änderungen innerhalb einer Bemessung erneut geprüft (erster Iterationskreislauf). Die endgültige Festlegung der Anforderungswerte ergibt sich aus den Ergebnissen der Iterationskreisläufe der Bemessung und der erweiterten Funktionsprüfung und -bewertung. Sollten die Anforderungen aus der erweiterten Funktionsprüfung und -bewertung so hoch werden, dass eine Herstellbarkeit unter heutigen Bedingungen nicht

möglich ist und damit der ingenieurtechnische Sicherheitsnachweis nicht mehr zuverlässig geführt werden kann, müssen die Anforderungen an das einzelne Barrierebauwerk grundlegend überdacht werden (**Schritt 4b**). Um die im Langzeitsicherheitskonzept verankerten Anforderungen zu gewährleisten, muss in einem solchen Fall eine Änderung des Endlagerkonzepts erfolgen, welche sich in geeigneten Maßnahmen zur Kompensation der Sicherheitsdefizite bzw. der technischen Machbarkeit widerspiegeln (z.B. Anordnung einer Reihenschaltung mehrerer gleichartiger Barrieren statt einer Barriere). Wird im Schritt 4 des Rahmenkonzeptes festgestellt, dass die Aufrechterhaltung der Sicherheitsfunktionen über den festgelegten Funktionszeitraum der geotechnischen Barriere durchgängig gewährleistet bleibt, ist der Nachweis einer langzeitsicheren Funktionstüchtigkeit des geotechnischen Verschlussbauwerks durch den ingenieurtechnischen Sicherheitsnachweis und der erweiterten Funktionsprüfung und -bewertung geführt. Im **Schritt 5** erfolgt eine nachvollziehbare Dokumentation der erzielten Ergebnisse und Nachweise. Diese Sicherheitsdokumentation dient als eines der Grundlagendokumente für das Genehmigungsverfahren.

6 Festlegung der Sicherheitsfunktionen, der Lebensdauer und der Funktionsindikatoren

Wie in Kapitel 3 und 4 dargestellt, werden an geotechnische Barrieren als Teil des Mehrbarrierensystems spezielle Forderungen gestellt, um die Einhaltung langzeitlicher Schutzziele bei der Endlagerung für hochradioaktive Abfälle zu ermöglichen. Die Spezifizierung der Sicherheitsfunktionen und der Lebensdauer als auch die Bestimmung der Funktionsindikatoren legen die Anforderungen fest, die an die zu bemessene geotechnische Barriere (Streckenverschluss) gestellt werden, und sind hinsichtlich der Langzeitsicherheitsbetrachtung für die Auswahl bzw. Einbeziehung möglicherweise eintretender FEP ausschlaggebend.

Sicherheitsfunktionen (SF)

Sicherheitsfunktionen definieren die Wirkungsweise der Barriere. Sie sind Eigenschaften oder Prozesse, durch deren Zusammenwirken die Erfüllung der sicherheitstechnischen Anforderungen während der Betriebs- und Nachbetriebsphase gewährleistet wird (BMU 2010). Die Bestimmung der Sicherheitsfunktionen der Teilkomponenten des Mehrbarrierensystems ergibt sich aus dem zugrunde gelegten Sicherheitskonzept und dem Verständnis des Begriffs Sicherheit.

Sowohl im Langzeitsicherheitsnachweis als auch in der ingenieurtechnischen Auslegung steht die Sicherheit im Hinblick auf die Einhaltung des Schutzziels „keine Gefährdung von Mensch und Umwelt“ im Vordergrund.

Der Eurocode definiert unter dem Begriff der Sicherheit die Fähigkeit des Tragwerkes zur Sicherstellung von Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit, die eine Gefährdung der öffentlichen Sicherheit und Ordnung verhindert (DIN EN 1990 2010 / Tabelle C-1 im Anhang C):

- Ein Tragfähigkeitsnachweis umfasst die Verhaltensprüfung des geotechnischen Bauwerks bei mechanischer Belastung, mit dem Ziel, dass es zu keiner Gefahr für Leib und Leben kommt.
- Ein Gebrauchstauglichkeitsnachweis überprüft den Erhalt der Funktionsfähigkeit des Bauwerks. Die Dichtigkeit ist ein Bestandteil des Gebrauchstauglichkeitsnachweises.

Im Eurocode wird dem Nachweis der Tragfähigkeit im Vergleich zu dem der Gebrauchstauglichkeit ein höherer Stellenwert zugeteilt. Dies äußert sich durch die Vorgabe höherer Sicherheitsbeiwerte, wodurch ein höheres Zuverlässigkeitsniveau erreicht wird. Bei einem Dichtigkeitsversagen eines geotechnischen Verschlusses in einem Endlager für radioaktive Stoffe besteht jedoch durch eine mögliche Freisetzung wassergefährdender Stoffe eine Gefahr für Leib und Leben. Daher sollten die Dichtigkeitsnachweise für ein geotechnisches Barrierebauwerk für ein Endlager für radioaktive Abfälle nicht den Gebrauchstauglichkeitsnachweisen zugeordnet werden, sondern hinsichtlich des Zuverlässigkeitsniveaus den Charakter eines Tragfähigkeitsnachweises erhalten (Kiefer 1997).

Ein geotechnisches Bauwerk gilt als sicher, wenn es seine ihm zugewiesene Aufgabe während der festgelegten Lebensdauer erfüllt. In einem zukünftigen Endlager haben „Strecken- und Schachtverschlüsse [...] die Aufgabe, Lösung vom Einlagerungsbereich fernzuhalten bzw. die Ausbreitung kontaminierter Lösung und Gase zu erschweren, bis die Salzgruskompektion soweit fortgeschritten ist, dass der Versatz eine ähnliche hydraulische Eigenschaft aufweist, wie das Salzgebirge“ (BUHMANN ET AL. 2010A S. 186). Das „Dichtelement [...] hat die Aufgabe, gegen das Eindringen/Austreten von Fluiden einerseits und den Transport von Radionukliden andererseits zu wirken“ (MÖNIG ET AL. 2012 S. 72). Um ein Verschlussbauwerk langzeitsicher auszulegen ist es somit notwendig, alle möglichen Einflüsse zu prüfen, die dessen Funktionsfähigkeit und demnach

die Dichtigkeit nachteilig beeinflussen könnten. Die Aufgabe einen Schadstoffaustritt zu vermeiden bzw. zu erschweren spiegelt sich neben den Definitionen von BUHMANN ET AL (2010A) und MÖNIG ET AL. (2012) auch im Grundgedanken des Sicherheitskonzeptes für Abdichtungssysteme in den GDA-Empfehlungen wider. Diese fordern, dass „das ausgewählte Abdichtungssystem [...] unter den einfallspezifischen Randbedingungen einen Schadstoffaustritt vermeiden, also „dicht“ sein [soll]“ (GDA 1997 S.168).

Das in der VSG (Mönig et. al 2012) verfolgte Sicherheitskonzept für ein Endlager im Salinar ist das des „Sicheren Einschlusses“ (Kapitel 3). Damit ist die übergeordnete Sicherheitsfunktion ‚Behinderung der Freisetzung und des Transports von Radionukliden‘ für das Gesamtsystem (Multi-barrierensystem) festgelegt. Aufbauend auf den Anforderungen aus dem ingenieurtechnischen Ansatz und denen der Langzeitsicherheit lassen sich zwei primäre Sicherheitsfunktionen definieren: SF ‚Ver- bzw. Behinderung eines Lösungszutritts‘ und die SF ‚Ver- bzw. Behinderung eines Austritts kontaminierter Lösung‘. Die geotechnischen Barrieren sind als Teil des Endlagersystems dementsprechend auszulegen. Die Hauptaufgabe der geotechnischen Barriere besteht daher darin, die Freisetzung und den Transport von Radionukliden soweit zu behindern, dass die im Nachweiszeitraum vorgegebenen Bewertungskriterien eingehalten werden. Als vorrangiges Ziel wird dabei die Einhaltung der SF ‚Ver- bzw. Behinderung eines Lösungszutritts‘ verfolgt. Sollte diese Zielsetzung nicht erreicht werden können, muss die zweite primäre SF ‚Ver- bzw. Behinderung eines Austritts kontaminierter Lösung‘ und damit die sekundären SF ‚Migrationsbehinderung¹¹ von Radionukliden u.a. Schadstoffen‘ und SF ‚Rückhaltung¹² von Radionukliden u.a. Schadstoffen‘ in den Vordergrund rücken. Angesichts dieser Präferenz werden zur Veranschaulichung des in dieser Arbeit aufgestellten Konzeptes zur Bemessung und Nachweisführung die zweite primäre SF ‚Ver- bzw. Behinderung eines Austritts kontaminierter Lösung‘ und damit die Prozesse der Migrationsbehinderung und Rückhaltung von Radionukliden und anderen Schadstoffen in den Hintergrund gestellt.

Aufgrund der ausgewählten primären SF ‚Ver- bzw. Behinderung eines Lösungszutritts‘ liegt das Hauptaugenmerk zur Risikominimierung hinsichtlich einer Verletzung des Schutzziels auf der Durchlässigkeit und damit auf der Dichtigkeit und Beständigkeit des Verschlussbauwerks. Die Untersuchung der Durchlässigkeit bzw. Dichtigkeit als Aspekte der Gebrauchstauglichkeit steht auch in Verbindung mit der Tragfähigkeit eines Bauwerks, da sich bei einem Tragwerksversagen die Permeabilität (Kriterium der Durchlässigkeit, siehe Funktionsindikatoren) erhöht. Gleichermaßen resultieren Permeabilitäts erhöhungen aus möglicherweise vorhandenen Umläufigkeiten in den Bereichen der Kontaktzone und der Auflockerungszone. Diesen Aspekt nimmt u.a. die GDA-Empfehlung (1997) bei ihrem Sicherheitsnachweis zur Dichtigkeit auf, indem sie die Prüfung der ‚Empfindlichkeit von Fehlstellen‘ fordert. Sogenannte Fehlstellen entsprechen Schwäche zonen im Bauwerk, in denen eine erhöhte Möglichkeit der Funktionalitätsbeeinträchtigung besteht. Diese sind bei einem Verschlussbauwerk am ehesten im Bereich der Kontaktzone zwischen Salzgestein und Abdichtungsbauwerk an der Firste als auch in der Auflockerungszone zu erwarten. Eine solche Prüfung würde eine Einzelbetrachtung der Elemente des Verschlussystems (Technische Konstruktion, Kontaktzone, Auflockerungszone, siehe Kapitel 8) verlangen. In der VSG (MÜLLER-HOEPPE 2012 A, B) wird ein über alle Bauwerkselemente gemittelter effektiver Wert (integrale Permeabilität) abgeleitet. Es stellt sich die Frage, ob dies für eine Auslegung ausreichend ist, oder ob eine Prüfung der Durchflussraten und -zeiten für die Einzelelemente, wie im ingenieur-

¹¹Migrationsbehinderung beschreibt in diesem Zusammenhang die Behinderung des Transports und der Verteilung von gelösten Schadstoffen im Verschlussbauwerk. Hierbei steht die Untersuchung des K_F -Wertes und damit die Hemmung durch Festkörpergefüge im Vordergrund.

¹²Die Rückhaltung beschreibt in diesem Zusammenhang die Sorptionsprozesse an den Feststoffpartikeln des Barrierebauwerks, durch die die Ausbreitung von Schadstoffen verzögert werden kann. Hierbei wird u.a. der K_D -Wert und damit das Verhältnis der Anteile der Fest- und Flüssigkeitsphasen betrachtet.

technischen Sicherheitsnachweis üblich (Kapitel 8.2), erfolgen sollte. Diese Überlegung begründet sich u.a. darauf, dass bei der Betrachtung langzeitlicher Einwirkungen, die durch hinzutretende wässrige Lösungen ihre Wirkungsstärke (Intensität) verändern, nicht nur die Kenntnis über das Gesamtlösungsvolumen an der bei einer einseitig anstehenden Flüssigkeitssäule abgewandten Seite ausschlaggebend ist, sondern auch der Zeitpunkt, wann die ersten Flüssigkeitsmengen das Verschlussbauwerk durchdrungen haben, da bereits geringe Menge an zutretender wässriger Lösung Milieuveränderungen hervorrufen können. Außerdem besteht die Möglichkeit, dass sich in höher permeablen Bereichen Kanalisierungen ausbilden, die unter Umständen eine Verletzung der Sicherheitsfunktion bewirken.

Die primäre Sicherheitsfunktion kann durch verschiedene Einwirkungen beeinflusst werden (siehe Kapitel 7). Um die sicherheitsrelevanten Anforderungen unter diesen Einwirkungen gewährleisten zu können, werden sekundäre und tertiäre Sicherheitsfunktionen definiert. Diese stehen mit der jeweiligen übergeordneten Sicherheitsfunktion im Zusammenhang und wirken sich auch auf diese aus. Um die primäre SF ‚Ver- bzw. Behinderung eines Lösungszutritts‘ sicher zu stellen, müssen die sekundären Sicherheitsfunktionen SF ‚günstiges chemisches Milieu‘, SF ‚hohe Festigkeit des Verschlussbauwerks‘ und SF ‚Verhinderung von Kanalisierungs- und Umläufigkeitseffekten im geotechnischen Verschlussystem‘ gewährleistet sein. Sekundäre Sicherheitsfunktionen können u.U. durch tertiäre Sicherheitsfunktionen beeinflusst bzw. sichergestellt werden. So können Kanalisierungs- und Umläufigkeitseffekte durch die SF ‚Kohäsiven Verbindung der Kontakte zwischen den Verschlussystemkomponenten‘, die SF ‚Hohe Lagesicherheit‘ und die SF ‚Geringe Korrosionsrate der Bauwerksmaterialien‘ reduziert bzw. verhindert werden. Eine Veränderung des geochemischen Milieus wird durch die SF ‚Geringe Metallkorrosion‘ und die SF ‚Geringe Auflösungs-/ Ausfällungsrate‘ geprüft.

Abb. 15 gibt einen Überblick über die verschiedenen Sicherheitsfunktionen (rot) einer geotechnischen Barriere und den ihnen zugeordneten Ebenen (primär, sekundär, tertiär). Das weiß untersetzte Feld im oberen Bereich der Abbildung veranschaulicht die für das gewählte Sicherheitskonzept „Sicherer Einschluss“ übergeordnete Sicherheitsfunktion ‚Behinderung der Freisetzung und des Transports von Radionukliden‘, die durch das Gesamtsystem (Mehrbarrierensystem) gewährleistet werden muss. Die geologische und die technische Barriere (grau) werden in dieser Arbeit nicht eingehender betrachtet. Ebenso wird die zweite primäre SF ‚Ver- und Behinderung eines Austritts kontaminierter Lösung‘ zwar angeführt, aufgrund der obengenannten Gründe aber in den weiteren Ausführungen nicht weiter behandelt.

Lebensdauer

Die Lebensdauer ist der Zeitrahmen, in dem die einzelnen Komponenten (Barrieren) ihre Sicherheitsfunktionen erfüllen müssen, um eine kontinuierliche Sicherheit des Gesamtsystems (Mehrbarrierensystem) innerhalb des Betrachtungszeitraumes von einer Million Jahre zu garantieren. Zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit eines Endlagersystems ist die Zeitspanne zu ermitteln, in der die Funktionstüchtigkeit der einzelnen Barrieren garantiert ist. Für Verschlussbauwerke für HLW-Endlager im Salinar ist gemäß des VSG-Sicherheitskonzepts (MÖNIG ET AL. 2012) ein Überlappungszeitraum einzubeziehen, indem die betrachtete Barriere (z.B. Streckenverschluss) ihre Funktion noch erfüllen muss, während sich die Funktionsfähigkeit einer anderen Komponente (Salzgrusversatz) erst aufbaut.

Die Festlegung der Lebensdauer nach VSG (MÖNIG ET AL. 2012) eines geotechnischen Verschlussbauwerks hängt somit von der Kompaktionsdauer des Salzgrusversatzes in den Strecken ab, der als langzeitstabile Barriere den „Sicheren Einschluss“ nach Ablauf der Lebensdauer der geotechnischen Barriere gemeinsam mit der geologischen Barriere gewährleisten wird. Die

Kompaktionsdauer ist abhängig von der Auflast des Gebirges, der Konvergenzrate und der Art der Salzgruseinbringung (angefeuchtet, naturtrocken). Derzeitig kann keine belastbare Aussage für einen solchen Zeitrahmen abgeleitet werden, da noch keine abschließenden empirischen oder experimentellen Daten zur Salzgruskompaktion (Endporosität, Zeitpunkt des Erreichens der Endporosität) vorliegen (THOMASKE & CHARLIER 2013). Nach derzeitigem Kenntnisstand können je nach Parameterkonstellation Zeiträume zwischen einigen 10er Jahren bis mehreren 1.000 Jahren (mitunter bis einige 10.000 Jahre) vergehen, bis der Zustand des kompaktierten Salzgruses dem Zustand von intaktem Steinsalz ähnelt. Dabei wird mit unterschiedlichen Materialparametern, wie trockenen Salzgrus, angefeuchteten Salzgrus und Salzgrus mit Zugabe von Bentonit experimentiert, um ein schnelles und optimales Kompaktionsverhalten zu erhalten (KORTHAUS 1996 / KRÖHN ET AL. 2009 / POPP ET AL. 2012 / STÜHRENBURG 2007).

In den Betrachtungen der VSG (MÜLLER-HOEPPE ET AL. 2012B) wird der Funktionszeitraum der geotechnischen Barrieren auf 50.000 Jahre begrenzt. Die Festlegung dieses Zeitraumes beruht auf der Annahme, dass zu diesem Zeitpunkt die nächste Eiszeit eintreten wird, und die für Verschlussbauwerke von grundlegender Bedeutung hydrogeologischen Verhältnisse im Deckgebirge ab diesem Zeitpunkt nicht mehr prognostiziert werden können. Dieser lange Zeitraum stellt eine große Herausforderung an die Materialien und die Konstruktionsweise der Verschlussbauwerke dar, um die hohen Sicherheitsanforderungen während der gesamten Lebensdauer einzuhalten.

In dieser Arbeit erfolgt die Auswahl langzeitlicher funktionsrelevanter Einwirkungen zunächst ohne eine explizite Begrenzung der Lebensdauer der Barriere. Zur Veranschaulichung des Konzeptes wird bei der beispielhaften Umsetzung (Schritt 2 des Rahmenkonzeptes) eine Lebensdauer von 1.000 Jahren postuliert. Der Einfluss der Salzgruskompaktion wird bei den Betrachtungen der Einwirkungen im Zusammenhang mit einem Lösungszutritt ausgeschlossen.

Funktionsindikatoren (FI)

Funktionsindikatoren sind numerische Werte, die Auskunft darüber geben, ob bzw. in wie weit eine Sicherheitsfunktion gewährleistet ist. Die Werte werden durch Versuchsdurchführungen, Berechnungen und Modellierungen bestimmt und mit den jeweils vorgegebenen Grenzwerten oder Kriterien verglichen, oder anhand von geeigneten Entscheidungskriterien eingeordnet (SKB 2011 / OECD-NEA 2012a, b).

In Abb. 15 sind die Funktionsindikatoren (hellblau) den jeweiligen Sicherheitsfunktionen zugeordnet. Dabei sind – wie für die Sicherheitsfunktionen – primäre, sekundäre und tertiäre Funktionsindikatoren zu unterscheiden.

Im Zusammenhang mit der primären Sicherheitsfunktion einer geotechnischen Barriere SF ‚Verhinderung eines Lösungszutritts‘ wird als primärer FI ‚effektive Permeabilität‘ untersucht. Dabei müssen alle Teilkomponenten des Streckenverschlusses betrachtet werden (siehe Kapitel 8).

Sekundäre Funktionsindikatoren stehen mit den sekundären Sicherheitsfunktionen in Beziehung. So sind der Eh- und pH-Wert sekundäre Funktionsindikatoren der sekundären SF ‚Günstiges geochemisches Milieu‘ und die unterschiedlichen auf das Bauwerk einwirkenden Spannungen und Drücke sowie die Konvergenz sekundäre Funktionsindikatoren der sekundären SF ‚Hohe Festigkeit des Verschlussbauwerks‘. Diese Funktionsindikatoren beschreiben die Widerstandsfähigkeit des Bauwerks. Die sekundäre SF ‚Verhinderung von Kanalisierungs- und Umläufigkeitseffekten im geotechnischem Verschlusssystem‘ wird durch die sekundären Funktionsindikatoren FI ‚Rate der Inneren Korrosion‘ und FI ‚Permeabilitäten potentieller Schwächezonen‘ beschrieben. Der FI ‚Permeabilitäten potentieller Schwächezonen‘ bezieht den Aspekt der in den GDA-Empfehlungen (1997) empfohlene Überprüfung der ‚Empfindlichkeit von Fehlstellen‘ ein und

untersucht damit die Permeabilität der einzelnen Schwächezonen des geotechnischen Verschlussystems, wie z.B. Bauwerksfugen, Kontaktzone, Auflockerungszone, Firste.

Die Beurteilung tertiärer Sicherheitsfunktionen durch tertiäre Funktionsindikatoren ist nicht nur für die tertiären Sicherheitsfunktionen von Bedeutung, sondern hat auch Auswirkungen auf die Funktionsindikatoren in einer höheren Ebene (sekundär, primär). Beispielsweise geben die Funktionsindikatoren, die im Zusammenhang mit Spannungsänderungen im Bereich der Kontaktstellen stehen, Auskunft über die Einhaltung der tertiären SF ‚Kohäsive Verbindung der Kontaktstellen‘ und sind für die Berechnung des sekundären FI ‚Permeabilitäten potentieller Schwächezonen‘ von Bedeutung. Einflüsse wie z.B. die Veränderung der Temperatur wirken sich auf die sekundären und tertiären Funktionsindikatoren aus und beeinflussen damit auch die primären Funktionsindikatoren.

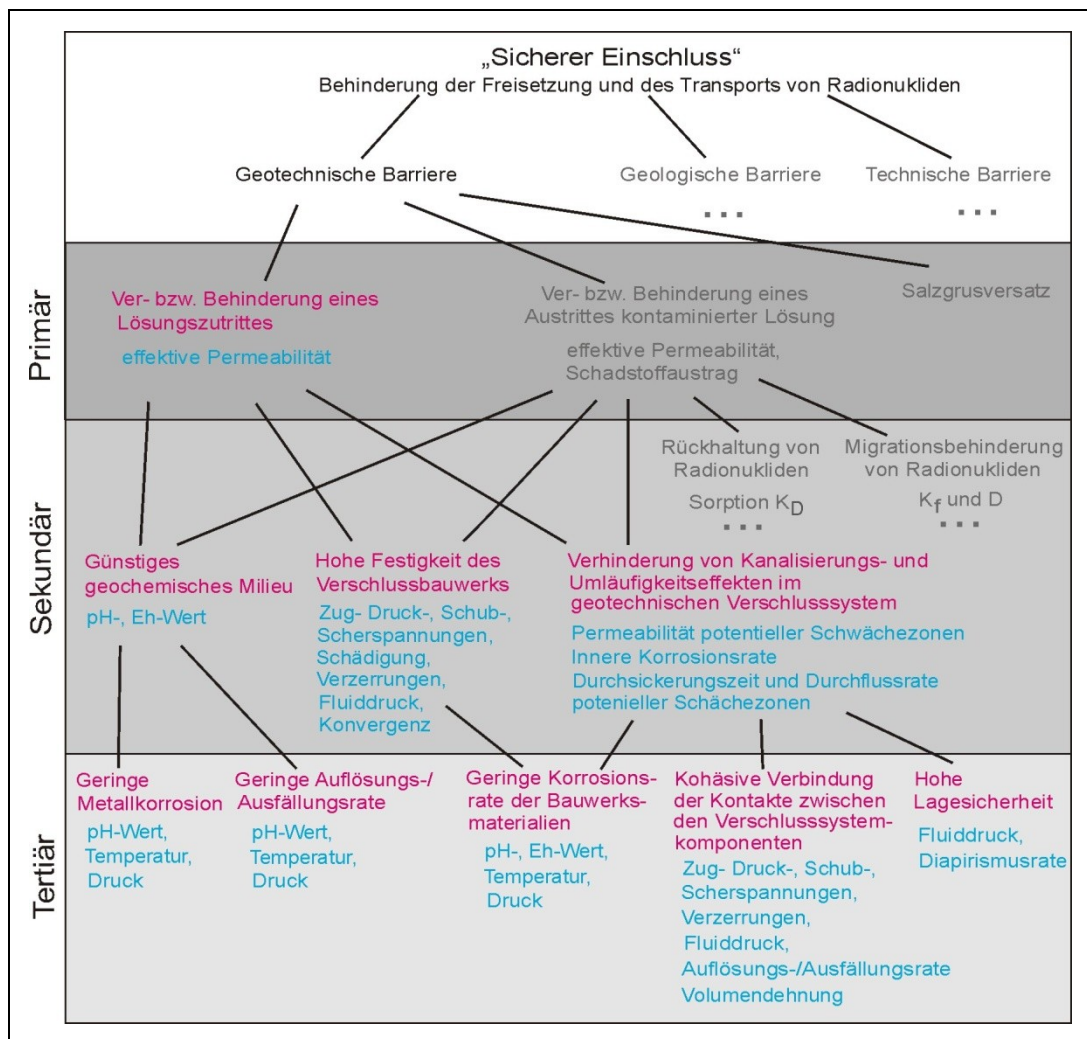


Abb. 15: Darstellung der Sicherheitsfunktionen (rot) und deren jeweiligen Funktionsindikatoren (blau) für eine geotechnische Barriere unter Berücksichtigung des Sicherheitskonzeptes „Sicherer Einschluss“

Anmerkung: * Schwächezonen beschreiben mögliche Fehlstellen im geotechnischen Verschlussystem, zu ihnen zählen z.B. Bauwerksfugen, die Kontaktzone, die Auflockerungszone und der Firstbereich.

Trotz unterschiedlicher Sicherheitsphilosophien in der Langzeitsicherheitsbewertung und ingenieurtechnischer Auslegung lassen sich die Vorgehensweisen durch die Spezifizierungen der Sicherheitsfunktionen und deren Funktionsindikatoren als auch der Lebensdauer miteinander verbinden. Dies bietet eine wichtige Schnittstelle zwischen Langzeitanalytik und Ingenieurtechnik.

7 Identifikation von Kriterien der Langzeitsicherheit

Um eine langfristige Sicherheit der geotechnischen Barrieren in einem Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Stoffe zu gewährleisten, ist es notwendig zu prüfen, ob die Auslegung gemäß ingenieurtechnischer Standards auch für längere Zeiträume ausreichend ist oder ob zusätzliche Anforderungen an die Auslegung solcher einer Barriere gestellt werden müssen. Bereits in Kapitel 5 wurde dargestellt, dass der FEP-Katalog (BUHMANN ET AL. 2010A) die Grundlage für den Langzeitsicherheitsnachweis eines zukünftigen Endlagers einschließlich seiner geotechnischen Barrieren bildet. Er enthält in Form von über einhundert FEP sämtliche Einwirkungen und Auswirkungen sowie sonstige relevante Aspekte, die nach derzeitigem Kenntnisstand in einem Endlager auftreten und auf die Barrieren wirken können. Eine Einwirkung muss dabei nicht notwendigerweise mit einer für die Sicherheitsfunktion negativen Auswirkung verbunden sein (z.B. begünstigt das Einsetzen der Konvergenz den Verschluss von Hohlräumen und damit den Erhalt der Sicherheitsfunktion). Die Auswirkungen anderer Einwirkungen können jedoch die Aufrechterhaltung der gestellten Sicherheitsfunktion negativ beeinflussen oder sogar zum Verlust derselben führen. Deshalb ist es notwendig zu prüfen, welche Einwirkungen auf ein Verschlussbauwerk auf lange Sicht eintreten, und ob der Grad der negativen Auswirkung einer Einwirkung zu einem Verlust der Sicherheitsfunktion führen würde und daher Gegenmaßnahmen in Form einer veränderten Auslegung ergriffen werden müssen.

Die wichtigsten Kriterien für eine langzeitliche Betrachtung umfassen den Einfluss bzw. die Veränderung der A) Temperatur, B) Mechanik, C) Chemie und D) Hydrologie/Hydraulik. Dies ist nachfolgend anhand einiger Beispiele dargestellt:

Temperaturveränderungen (A), z.B. hervorgerufen durch die FEP „Wärmeproduktion“ und „Permafrost“, spielen besonders an den Kontaktbereichen unterschiedlicher Materialien bzw. zwischen Material und dem umgebenden Wirtsgestein eine Rolle. Eine zughafte Entlastung bzw. kompressive Belastung kann sich als Folge der aus den Temperaturveränderungen hervorgerufenen direkten Einwirkungen, z.B. FEP „Thermische Expansion/Kontraktion der Materialien“, in Form von neu gebildeten Wegsamkeiten negativ auf die Dichtigkeit eines geotechnischen Verschlussbauwerks auswirken. Neben direkten Einwirkungen können Temperaturveränderungen auch indirekte Einwirkungen auf ein Verschlussbauwerk generieren. So können Temperaturveränderungen zu einer Änderung des FEP „Geochemisches Milieu im Grubenbau“ führen, welches Einfluss auf die Ausprägung des FEP „Alteration von Strecken- und Schachtverschluss“ (Auswirkung) hat.

Mechanische Einwirkungen (B) auf einen geotechnischen Verschluss entstehen z.B. aus den FEP: „Lokale Differenzialbewegung“, „Diapirismus“, „Inlandvereisung“, „Erosion“, „Fluiddruck“, „Konvergenz“, wie auch aus thermischen und hydraulischen Einwirkungen (z.B. FEP „Thermische Expansion/Kontraktion“). Auswirkung der mechanischen Einwirkungen sind Spannungsänderungen/-umlagerungen. Ein wichtiger Punkt bei dieser Betrachtung ist u.a. die Rissbildung (ausgelöst durch thermische und/oder mechanische Veränderung), die durch Spannungsänderungen (z.B. in Zug- und Scherspannung) und/oder den Druckanstieg in Hohlräumen oder Porenräumen (hydrostatischer und hydrodynamischer Fluiddruck) hervorgerufen wird.

Eine chemische Einwirkung (C) auf ein geotechnisches Bauwerk ist z.B. das FEP „Geochemisches Milieu im Grubenbau“. Im Laufe der Zeit kann sich das geochemische Milieu unter Einfluss von Temperaturveränderungen, Druckveränderungen oder Zutritt von Lösungen verändern. Es können dann z.B. Auflösungs- und Ausfällungsprozesse einsetzen, die die Alteration der geotechnischen Barriere intensivieren und möglicherweise den Widerstand gegen auftretende Einwirkungen herabsetzen können.

Hydrologisch-hydraulische Einwirkungen (D) stehen im Zusammenhang mit anstehenden wässrigen Lösungen. Auslöser für das Auftreten von Lösungen an einem Streckenverschluss können u.a. wässrige Lösungen von außen oder bereits im Grubengebäude vorhandenen Lösungen aus der Restfeuchte des Salzgrusversatzes, der Luftfeuchtigkeit, der Feuchtigkeit des verwendeten Betons oder Lösungseinschlüsse im Umgebungsgestein sein. Diese Einwirkungen können einerseits eine Auswirkung auf die Entwicklung des geochemischen Milieus und somit auf die Alteration des Verschlussbauwerks haben, andererseits können sie hydraulische Auswirkungen nach sich ziehen. Beide Auswirkungen beeinflussen z.B. das FEP „Kanalisation in Dichtelementen“, welches zu einer Einschränkung bis zu einem Verlust der primären Sicherheitsfunktion führen kann.

Schon aus dieser exemplarischen Darstellung des Zusammenhangs zwischen Einwirkung und Auswirkung ist erkennbar, dass sich bereits die vier großen Haupteinwirkungsgruppen (thermisch, mechanisch, chemisch und hydrologisch) gegenseitig beeinflussen. Jede von ihnen stellt zwar eine separate Einwirkungsgruppe dar, jedoch hängt das Ausmaß der mechanischen und chemischen Einwirkungen mitunter von den thermischen und/oder hydrologischen Gegebenheiten ab. Aufgrund der obengenannten Beispiele ist bereits festzustellen, dass aus thermischen und hydrologisch-hydraulischen Einwirkungen nur mechanische und chemische Auswirkungen resultieren, die wiederum direkt auf das untertägige Bauwerk einwirken. Diese Abhängigkeiten müssen hinsichtlich ihrer Relevanz für die Auslegung der geotechnischen Barriere geprüft werden.

An dieser Stelle wird betont, dass in den folgenden Ausführungen die Betrachtung der Lösungsmigration im Vordergrund steht. Ziel dieses Kapitels ist es, diejenigen Einwirkungen zu identifizieren, die mit ihren Auswirkungen hinsichtlich der Langzeitsicherheit einer geotechnischen Barriere für eine Vorbemessung relevant sind. Die Festlegung dieser Einwirkungen, im Folgenden FEP-Einwirkungen genannt, bildet die Grundlage für einen Abgleich mit den ingenieurtechnischen Auslegungskriterien und gibt Aufschluss darüber, ob zusätzliche Anforderungen bei einer Auslegung beachtet werden müssen.

7.1 Identifizierung der FEP hinsichtlich der Auslegung eines Verschlussbauwerks

Grundlage bei der Identifizierung der FEP ist der FEP-Katalog (BUHMANN ET AL. 2010A). Er enthält 112 FEP, die Merkmale, Ereignisse und Prozesse beschreiben, die in einem Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Stoffe im Salinar auftreten können und für die langzeitliche Entwicklung betrachtet werden sollten. 48 FEP werden als Einwirkungen auf die Funktion einschlusswirksamer Barrieren beschrieben. Davon sind 15 FEP als „direkte Einwirkung“ auf die Funktion von Strecken- und/oder Schachtverschlüssen ausgewiesen (Tab. 2). Die Auswahl der FEP für ein Referenzszenarium begründet sich nach BUHMANN ET AL. (2010B) auf die im FEP-Katalog festgelegten Zuordnung hinsichtlich: 1.) der Klassifizierung als Randbedingung oder der Einstufung „wahrscheinlich“ hinsichtlich der „bedingten Eintrittswahrscheinlichkeit“, 2.) der Berücksichtigung des FEP bei einem Strecken- bzw. Schachtverschluss, 3.) des direkten Einflusses auf die Funktion einer Barriere, und 4.) der Kennzeichnung als direkte Einwirkung auf einen Strecken- oder Schachtverschluss (BUHMANN ET AL. 2010B). Auf Grundlage dieser Zuordnungspunkte sind in Tab. 2 die FEP für ein Referenzszenarium orangefarbig hinterlegt.

In Kapitel 5 wird beschrieben, dass es im Rahmen der (Vor-) Bemessung der geotechnischen Barrieren notwendig ist auch FEP zu berücksichtigen, die nicht zum Referenzszenarium gehören. Für die Bearbeitung der Fragestellung dieses Kapitels wurden daher alle FEP betrachtet, die als Einwirkung, Auswirkung oder direkt mit einem geotechnischen Bauwerk in Verbindung gebracht

werden können. Diese Auswahl liefert 52 FEP, die eine unmittelbare Einwirkung oder Auswirkung auf eine geotechnische Barriere besitzen oder in diesem Zusammenhang berücksichtigt werden sollten (Spalte ‚Auswahl FEP‘ in Tab. 2). Die jeweilige Begründung für diese FEP-Auswahl ist in Tabelle D-1 (Anhang D) beschrieben. Das aufgestellte Rahmenkonzept in Kapitel 5 weist auf eine anfängliche Trennung zwischen Sicherheitsnachweis und Auslegung hin. Die Auswahl der FEP für einen Langzeitsicherheitsnachweis bildet die Grundlage zur Differenzierung der FEP, die auch für die Auslegung eines Verschlussbauwerks im Sinne einer Vorbemessung einbezogen werden (siehe Tab. 2 Auswahl FEP LZS / VB). Für die weiteren Betrachtungen in diesem Kapitel werden nur die FEP für die Vorbemessung einer Bauwerksauslegung herangezogen. Die Auswahl dieser FEP richtet sich nach folgenden Auswahlkriterien:

- 1.) Die FEP-Auswahl basiert auf der primären Sicherheitsfunktion (SF ‚Ver- und Behinderung eines Lösungszutrittes‘) und der festgelegten Lebensdauer.

Da eine Lebensdauer für geotechnische Verschlussbauwerke derzeit nicht eindeutig festlegbar ist, werden die FEP zur Vorbemessung zeitoffen ausgewählt und in die einzelnen Betrachtungsschritte dieses Kapitels einbezogen. Da zur Veranschaulichung des Konzeptes ein Zeitraum von 1.000 Jahren gewählt wurde (siehe Kapitel 6), werden die in diesem Betrachtungszeitraum relevanten FEP in jedem Auswahlschritt zusätzlich eingehender beschrieben.

- 2.) Die FEP-Auswahl wird zum Zweck einer sinnvollen Vorbemessung durchgeführt und folgt folgenden Prüfkriterien:

- a. Plausibilität (FEP, die offensichtlich nicht für ein Vorbemessungsszenarium in Betracht kommen, werden nicht berücksichtigt),
- b. hohe Eintrittswahrscheinlichkeit oder geringe Eintrittswahrscheinlichkeit mit hoher Konsequenz hinsichtlich der Sicherheitsfunktion,
- c. geringe Komplexität (Betrachtung isolierter FEP und FEP mit simplifiziertem Vernetzungsgrad).

- 3.) Fällt die Auswahl auf ein FEP, welches der 1. Ebene zugehörig ist, werden die zugehörigen FEP der 2. Ebene mit einbezogen.

Der FEP-Katalog ordnet die FEP in verschiedene Ebenen ein. „Die FEPs der 1. Ebene können entsprechend durch andere ausgelöst bzw. beeinflusst werden, die dann die 2. Ebene bilden [...]. Dabei können die auslösenden FEPs der 2. Ebene für die auslösenden der 1. Ebene wichtig werden, wenn sie deren Auswirkungen intensivieren. Die auslösenden FEPs der 1. Ebene werden auch durch beeinflussende der 2. Ebene geprägt, so dass sich über diese Beeinflussung die Ausprägung des auslösenden FEP ändern kann, welches sich wiederum auf das jeweils diskutierte FEP in entsprechender Weise auswirkt“ (BUHMANN ET AL. 2010B S. 18).

- 4.) Es werden nur Einwirkungen betrachtet.

Tab. 2: Übersicht über die Auswahl von FEP für die Szenarien bezüglich der Langzeitsicherheit (LZS) und der Vorbemessung (VB) für die Auslegung einer geotechnischen Barriere

Abkürzung: StrV=Streckenverschluss, SchV=Schachtverschluss; ewB=einschlusswirksame Barriere

1 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit: Wahrscheinlich (Punkt •) Randbedingung (R) 2 bei StrV / SchV zu berücksichtigen

3 Einwirkung auf die Funktion der ewB a=indirekt b=direkt 4 direkte Einwirkung auf StrV/SchV.

1	2	3		4	FEP Name	Auswahl FEP	
		a	b			LZS	VB
					Unplanmäßige Ereignisse in der Betriebsphase		
					Kokillensticking und -absturz		
•					Neotektonische Vorgänge	X	
					Orogenese		
•					Senkung der Erdkruste		
					Hebung der Erdkruste	X	
•					Lokale Differenzialbewegungen	X	
•					Krustendeformation		
					Grabenbildung (Taphrogenese)		
•					Erdbeben	X	X
					Magmatismus		
					Gesteinsmetamorphose		
					Hydrothermale Aktivität		
•	•	•	•		Erosion	X	X
•		•			Sedimentation		
•					Diagenese		
•	•	•	•		Diapirismus	X	X
•		•			Subrosion		
•					Einfluss geologischer Veränderungen auf die Hydrogeologie		
•		•			Globale klimatische Veränderungen	X	
•		•			Transgression oder Regression	X	
•		•			Permafrost	X	X
•		•			Inlandvereisung in randlicher Lage	X	X
•		•			Vollständige Inlandvereisung	X	X
					Meteoriteneinschlag		
			•		Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen		
R	•				Inventar: Radionuklide	X	
R	•				Inventar: Metalle	X	X
R	•	•			Inventar: Organika		
R	•	•			Inventar: Sonstige Stoffe		
R					Abfallmatrix		
R					Behälter		
•					Behälterausfall		
R	•				Versatz	X	
R	•	•	•		Verschlussmaterial	X	
•	•	•	•		Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen	X	
	•	•	•		Fehlerhaftes Erstellen eines StrV- oder SchV	X	
R	•	•			Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften		
•	•	•	•		Konvergenz	X	X
R	•	•	•		Fluiddruck	X	X
•	•	•			Versatzkompaktion	X	
•	•	•	•		Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	X	X
	•	•	•		Versagen eines SchV oder StrV	X	
•	•	•	•		Lageverschiebung des SchV	X	
R	•				Porosität		
R	•				Permeabilität	X	
R	•	•			Lösungen im Grubenbau	X	X
•	•				Kanalisation im Versatz	X	
•	•	•	•		Kanalisation in Dichtelementen	X	
•	•	•			Lösungszutritt ins Grubengebäude	X	X
•	•	•			Strömungsvorgänge im Grubengebäude	X	
•	•	•	•		Quellen des Bentonits	X	X
R	•	•			Geochemisches Milieu im Grubenbau	X	X

1	2	3	4	FEP Name	Auswahl FEP	
					LZS	VB
	a	b				
•	•	•	•	Auflösung und Ausfällung	X	X
•	•			Metallkorrosion	X	X
•				Matrixkorrosion		
•				Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme		
•	•	•	•	Zersetzung von Organika		
•	•	•		Mikrobielle Prozesse im Grubenbau		
•	•	•		Wärmeproduktion	X	X
•	•	•		Thermische Expansion oder Kontraktion	X	X
•	•			Verdampfen von Wasser		
•	•			Gasbildung	X	
R	•			Gasmenge im Grubenbau	X	
R	•	•		Gasvolumen im Grubenbau	X	
R	•			Gaseindringdruck	X	
•	•			Gasstrom aus Grubenbau		
				Zündfähige Gasgemische		
•				Strahlungsinduzierte Aktivierung		
•				Materialversprödung durch Strahlung		
•				Radiolyse		
				Erreichen einer kritischen Ansammlung (Kritikalität)		
R	•	•	•	Auflockerungszone	X	X
R	•			Wirtsgestein		
R		•		Klüfte im Wirtsgestein		
R				Deck- und Nebengebirge		
R		•		Störungen und Störungszonen		
•	•	•	•	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	X	
				Selbstversatz		
R	•	•		Fluidvorkommen im Wirtsgestein		
				Lösungsmigration im Wirtsgestein		
R	•			Grundwasserströmung in der Geosphäre		
•				Gasströmung in der Geosphäre		
R	•			Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge		
•				Mikrobielle Prozesse in der Geosphäre		
				Geothermische Prozesse in der Geosphäre		
•				Wärmebedingte Hebung oder Senkung des Deckgebirges		
•	•	•		Thermisch bedingte Spannungsänderungen im Wirtsgestein	X	X
•	•			Temperaturänderung am Salzspiegel		
•	•			Thermomigration		
				Thermische Carnallitzerersetzung		
				Schmelzen des Salzgesteins		
•		•		Thermochemische Sulfatreduktion		
•		•		Gasinfiltration ins Salzgestein		
				Unerkannte Merkmale		
				Fehlinterpretierte Erkundungsergebnisse		
R				Topografie		
R				Oberflächengewässer		
•	•			Radioaktiver Zerfall		
•				Radionuklid-Mobilisierung		
•	•			Sorption und Desorption	X	
•	•			Kolloide	X	
•	•			Komplexbildung	X	
•	•			Radionuklidtransport in der flüssigen Phase	X	
•	•			Advektion	X	
•	•			Konvektion	X	
•	•	•		Diffusion	X	
•	•			Matrixdiffusion	X	
•	•			Mechanische Dispersion	X	
•				Sonstige Transportprozesse in der flüssigen Phase		
•		•		Feststoffgebundener Radionuklidtransport		
•	•			Radionuklidtransport in der Gasphase	X	

Selektion für ein Streckenverschlussbauwerk (ohne Begrenzung einer Lebensdauer)

Werden die FEP mit Hilfe der oben genannten Kriterien selektiert, verbleiben 20 für die weitere Betrachtung hinsichtlich der Vorbemessung (Tab. 2). Die jeweiligen Ausschlussgründe sind in Tabelle D-2 (Anhang D) aufgelistet. Da bei den Betrachtungen die Lösungsmigration im Vordergrund steht, werden die Einflüsse aus der Gasentwicklung nicht einbezogen. Deshalb wird z.B. das FEP „Fluiddruck“ nur im Zusammenhang mit Lösungen betrachtet.

Das Ereignis „Erdbeben“ wird in den weiteren Ausführungen zwar einbezogen, innerhalb einer ingenieurtechnischen Bauwerksauslegung aber meist gesondert betrachtet, da es eine nicht quantifizierbare Eintrittswahrscheinlichkeit besitzt, die Größenordnung dieser Einwirkung nicht abgeschätzt werden kann und gesonderte ingenieurtechnische Regelwerke zur Berücksichtigung dieser Einwirkung vorliegen. Das FEP „Nicht thermische induzierte Volumenänderung“ umfasst neben der Metallkorrosion, mineralischen Umwandlungen des Salzgesteins auch material-spezifische Prozesse bei Feuchtigkeitsaufnahme oder -abgabe wie z.B. das Quellen des Bentonits oder das Schwinden des Betons. Die Metallkorrosion und das Quellen des Bentonits werden als eigenständige FEP angesprochen. Der Prozess des Schwindens des Betons wird bereits während der Betriebsphase bei der Bauwerkserstellung betrachtet. Da er aber in Bezug auf die Ausbildung der Kontaktzone für die Dichtigkeit des Bauwerks eine wichtige Rolle spielt, wird dieser Aspekt in dieser Arbeit auch in der Langzeitsicherheitsbetrachtung einbezogen. Zwei weitere FEP (FEP „Auflockerungszone“ und „Lösungen im Grubenbau“) sind zwar keine Einwirkungen, müssen aber dennoch in den Betrachtungen mit berücksichtigt werden. Das Merkmal „Auflockerungszone“, ist als Teilbereich des geotechnischen Verschlussystems für die Auslegung relevant. Das Volumen und die Zusammensetzungen von „Lösungen im Grubenbau“ sind wichtige Randbedingungen für die Ausprägung vieler FEP-Einwirkungen.

Da das Merkmal „Geochemisches Milieu im Grubenbau“ stark die Alteration des Verschlusses beeinflusst und damit in hohem Maße die Sicherheitsfunktion des Bauwerkes beeinflussen kann, wird es im weiteren Verlauf als eine „Änderung des geochemischen Milieus“ verstanden und als Einwirkung betrachtet. Die „Wärmeproduktion“ als FEP der 2. Ebene beeinflusst viele FEP (Kapitel 7.2) und wird daher als wichtige Einwirkung angesehen. Das FEP „Inventar Metalle“ steht als Randbedingungen eng mit dem Prozess der „Metallkorrosion“ im Zusammenhang und wird deshalb mit diesem zusammen betrachtet. Beim Bau von untertägigen Bauwerken wird versucht organisches Material zu vermeiden. Mögliche Restbestände (z.B. Kabel u.a.) sollten im Verlauf des Rückzugs entfernt werden. Dadurch werden an dieser Stelle das FEP „Inventar Organika“ und das damit zusammenhängende FEP „Zersetzung von Organika“ in die Betrachtungen nicht einbezogen.

Demnach können neben dem FEP „Lösungen im Grubenbau“ und dem FEP „Auflockerungszone“ 17 FEP-Einwirkungen identifiziert werden, die bei einem geotechnischen Bauwerk während einer Vorbemessung überprüft werden müssen, wenn keine Lebensdauer des Bauwerkes vorgegeben wurde:

FEP-Einwirkungen:

- Erdbeben,
- Erosion,
- Diapirismus,
- Permafrost,
- Inlandvereisung in randlicher Lage,
- Vollständige Inlandvereisung,
- Konvergenz,
- Fluiddruck,
- Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien,

- Lösungszutritt ins Grubengebäude,
- Quellen des Bentonits,
- Änderung des geochemischen Milieus im Grubenbau,
- Auflösung und Ausfällung,
- Inventar Metalle/Metallkorrosion,
- Wärmeproduktion,
- Thermische Expansion oder Kontraktion,
- Thermisch bedingte Spannungsänderungen im Wirtsgestein.

Selektion für ein Streckenverschlussbauwerk mit einer Lebensdauer von 1.000 Jahren

Bei der Auswahl von FEP, die auf ein Streckenverschlussbauwerk mit einer festgelegten Lebensdauer von 1.000 Jahren einwirken, können von den bereits selektierten FEP für ein Streckenverschlussbauwerk ohne Begrenzung einer Lebensdauer die FEP vernachlässigt werden, die erst in späteren Zeiträumen auftreten. Das sind die FEP, die im Zusammenhang mit einer globalen klimatischen Veränderung (FEP „Permafrost“, „Inlandvereisung in randlicher Lage“ und „Vollständige Inlandvereisung“) stehen, aber auch Einwirkungsprozesse, die in der Zeitspanne von 1.000 Jahren keine relevanten Auswirkungen besitzen (FEP „Erosion“ und „Diapirismus“). Die jeweiligen Ausschlusskriterien sind in Tabelle D-2 (Anhang D) angegeben.

Demnach können neben dem FEP „Lösungen im Grubenbau“ und dem FEP „Auflockerungszone“ 12 FEP-Einwirkungen identifiziert werden, die bei einem Streckenverschluss überprüft werden müssen, wenn die Lebensdauer des Bauwerkes auf 1.000 Jahre beschränkt wird:

FEP-Einwirkungen:

- Erdbeben,
- Konvergenz,
- Fluiddruck,
- Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien,
- Lösungszutritt ins Grubengebäude,
- Quellen des Bentonits
- Änderung des geochemischen Milieus im Grubenbau,
- Auflösung und Ausfällung,
- Inventar Metalle/Metallkorrosion,
- Wärmeproduktion,
- Thermische Expansion oder Kontraktion,
- Thermisch bedingte Spannungsänderungen im Wirtsgestein.

7.2 Kategorisierung der ausgewählten FEP

Die Kategorisierung wird durchgeführt, um übergeordnete Einwirkungen oder Gemeinsamkeiten der FEP-Einwirkungen zu erkennen, die bei der Auslegung eines Verschlussbauwerks relevant werden können.

Kategorisierung nach Abhängigkeiten

Die Abhängigkeiten einzelner FEP untereinander können die Ausprägungen der damit verbundenen Einwirkungen und damit u.U. die Integrität der geotechnischen Barriere beeinflussen. Deshalb ist es sinnvoll, die ausgewählten FEP zu kategorisieren, um übergeordnete auslösende FEP zu identifizieren, die möglicherweise ausschlaggebend für die Auslegung eines Verschlussbauwerks sein können.

Abb. 16 zeigt die Beeinflussungen zwischen den einzelnen für die Vorbemessung identifizierten FEP in Form einer Matrix. Einzelne FEP können andere FEP auslösen (orange Unterlegung), von anderen beeinflusst werden oder selbst beeinflussend wirken (hellblaue Unterlegung) oder sich gegenseitig beeinflussen (dunkelblaue Unterlegung). Diese Darstellung basiert auf der Darstellung von Abhängigkeiten im FEP-Katalog (BUHMANN ET AL. 2010A). In einigen Fällen wurden Abhängigkeiten zwischen einzelnen FEP überarbeitet oder neu hinzugefügt. Diese Änderungen beruhen auf der subjektiven Betrachtung der Autorin hinsichtlich der Fragestellung der vorliegenden Arbeit und den Einbezug von indirekten Abhängigkeiten. Die Änderungen sind mit einer schwarzen Umrandung kenntlich gemacht. Die Gründe der Änderungen sind in Tab. D-3 (Anhang D) angegeben.

	Erdbeben	Erosion	Diapirismus	Permafrost	Inlandvereisung in randl. Lage	Vollständige Inlandvereisung	Konvergenz	Fluiddruck	Versatzkompaktion	Nicht therm. ind. Vol.-Ä.	Lösungen im Grubenbau	Lösungszutritt ins GB	Quellen des Bentonits	Geochem. Milieu	Auflösung/Ausfällung	Metallkorrosion	Wärmeproduktion	Therm. Expansion/Kontraktion	Auflockerungszone	Therm. bedingte SpÄ im WG	
Erdbeben																					
Erosion				-2	-2	-2															
Diapirismus					-1	-1															
Permafrost		2				-1							1					2		1	
Inlandvereisung in randl.Lage		2	1															2		1	
Vollständige Inlandvereisung		2	1	1														2		1	
Konvergenz								0	1	2	0		0				-1	-1	1	-1	
Fluiddruck							0		0	0	-1	0	0	0	1	1	-1	-1			
Versatzkompaktion							-1	2	0			0					-1	-1			
Nicht therm. ind. Vol.-Ä.							0	0			-1	-1	-2	-1		-2					
Lösungen im Grubenbau								1		1		-1	1	1	2	2	-1				
Lösungszutritt ins GB								0	0	1	1		1	1	1	1			-1		
Quellen des Bentonits				-1			0	0		2	-1	-1		-1				-1	0		
Geochem. Milieu								0		1	-1	-1	1		0	0	0				
Auflösung und Ausfällung								-1			-2	-1		0			-1				
Metallkorrosion								-1		2	-2	-1		0			-1	2			
Wärmeproduktion							1	1	1		1			0	1	1	-2		2	1	2
Therm. Expansion/Kontraktion				-2	-2	-2	1	1	1				1				-2		1	2	
Auflockerungszone							-1					1	0				-1	-1		-1	
Thermisch bedingte SpÄ im WG				-1	-1	-1	1										-2	-2	1		

Abb. 16: Darstellung der Abhängigkeiten zwischen den identifizierten FEP auf ein Verschlussbauwerk (modifiziert nach BUHMANN ET AL. 2010A)

-2= FEP in Zeile wird durch FEP in Spalte ausgelöst, -1= FEP in Zeile wird durch FEP in Spalte beeinflusst, 2= FEP in Zeile löst FEP in Spalte aus, 1= FEP in Zeile beeinflusst FEP in Spalte, 0=gegenseitige Beeinflussung; Abkürzungen: SpÄ=Spannungsänderung, randl.=randlich, ind.=induziert, Vol.-Ä=Volumenänderung, therm=thermisch, WG=Wirtsgestein, GB=Grubengebäude.

Auslösende und einseitig beeinflussende FEP sind innerhalb einer langzeitlichen Betrachtung gut handhabbar, da die Veränderungen der ausgelösten bzw. beeinflussten FEP zu ihrer erwarteten Entwicklung abschätzbar sind. Für gekoppelte (sich gegenseitig beeinflussende) FEP ist eine

solche Abschätzung schwieriger, da sich mit jeder Veränderung eines FEP auch eine Veränderung des anderen verknüpft und es wiederum zu einer Rückkopplung mit dem ersten FEP kommt.

Im Hinblick auf eine Bauwerksauslegung ist es von grundlegender Bedeutung, zum einem die FEP-Einwirkungen und ihre Abhängigkeiten zu erkennen, deren Einwirkungsintensitäten sich verändern können, und zum anderem die auslösenden Faktoren zu erfassen, die zu einer Veränderung führen. In Bezug auf diese Fragestellung lassen sich die ausgewählten FEP in fünf in ihrer Einwirkungsart unterschiedliche Kategorien zuordnen:

- 1) Einwirkungen, die nur von über Tage wirken.
- 2) Einwirkungen, die unter Tage wirken, aber unbeeinflusst durch andere FEP sind.
- 3) Einwirkungen, die unter Tage wirken und direkt durch den Wärmeeinfluss der eingelagerten Abfälle beeinflusst werden.
- 4) Einwirkungen, die unter Tage wirken und indirekt durch den Wärmeeinfluss der eingelagerten Abfälle beeinflusst werden.
- 5) Einwirkungen, die unter Tage wirken und die sowohl durch den Wärmeeinfluss der eingelagerten Abfälle unter Tage als auch durch Temperaturveränderungen über Tage ausgelöst werden.

Abb. 17 zeigt eine Kategorisierung, bei der nur einseitige Abhängigkeiten und auslösende Wirkungen einbezogen werden. Gegenseitige Beeinflussungen werden aufgrund ihrer Komplexität nicht dargestellt. Es können zwei Großgruppen von Einwirkungen unterschieden werden: die Einwirkungen, die von über Tage Einfluss auf die Sicherheitsfunktion der Barriere besitzen und die Einwirkungen, die unter Tage auf das Bauwerk einwirken können. Im linken Bereich der Abb. 17 sind die für die Vorbemessung ausgewählten FEP-Einwirkungen und deren Zusammenfassung (übergeordnete FEP-Einwirkungen) aufgelistet, im mittleren Bereich die erstellten Kategorien.

In der obersten Zeile der Abb. 17 werden die Einwirkungen dargestellt, die ausschließlich von über Tage einwirken. Diese Kategorie entspricht auch der ersten Großgruppe. Zu ihnen gehören die FEP „Erosion“, „Permafrost“, „Inlandvereisung in randlicher Lage“ und „Vollständige Inlandvereisung“. Im Allgemeinen ist die Erosion ein langsamer Prozess und hat keinen nennenswerten Einfluss auf ein untertägiges Verschlussbauwerk. Bei einer Vereisung hingegen könnten sich die Erosionsraten dahingehend verändern, dass durch die damit einhergehenden Spannungsänderungen eine Beeinflussung eines untertägigen Bauwerks nicht auszuschließen ist. Deshalb werden alle FEP der ersten Zeile als Einwirkungen globaler Klimaänderungen zusammengefasst.

Die zweite Großgruppe beinhaltet die Einwirkungen, die ausschließlich unter Tage auftreten. Sie umfasst die Kategorien der unbeeinflussten Einwirkungen, der durch Wärme beeinflussten Einwirkungen und der durch Wärme ausgelösten Einwirkungen.

Unbeeinflusste Einwirkungen entsprechen der Kategorie 2 (Abb. 17 grün). Sie werden durch keine anderen der ausgewählten FEP ausgelöst oder beeinflusst, können selbst aber FEP auslösen oder beeinflussen. Zu ihnen gehören die FEP „Erdbeben“, „Diapirismus“, „Lösungszutritt im Grubenbau“ und die „Wärmeproduktion“. Die FEP „Erdbeben“ und „Diapirismus“ sind natürliche geologische Erscheinungen, bedingt durch regional oder überregionale tektonische Prozesse. Das FEP „Lösungszutritt ins Grubengebäude“ ist maßgeblich für die Auslegung eines Verschlussbauwerks, um im Sinne des Mehrbarrierenkonzepts die Sicherheit des Endlagers zu betrachten (Kapitel 3). Ein Lösungszutritt vergrößert die Menge an vorhandenen Lösungen und zieht u.a. Veränderungen hinsichtlich des Fluiddrucks, als auch von Prozessen der Korrosion, Zersetzung, Auflösung und damit des gesamten geochemischen Milieus nach sich. Unter dem Begriff FEP „Wärmeproduktion“ wird die Wärmeentwicklung aus den eingelagerten radioaktiven Abfällen verstanden. Die Wärmeübertragung ins umliegende Gestein (Steinsalz) könnte, bedingt durch dessen gute Leitfähigkeit,

eine Temperaturveränderung bis in die Bereiche der Verschlussbauwerke bewirken, und dortige FEP-Einwirkungen in ihrer Intensität direkt oder indirekt verändern (Abb. 17 rot).

In diesem Zusammenhang steht die Kategorie 3: Einwirkungen, die direkt von der Wärmeentwicklung beeinflusst werden. Eine Erhöhung der Temperatur kann eine schnellere Korrosion von Metallen sowie Veränderungen der chemischen Reaktionen in Bezug auf Auflösungs- und Ausfällungsprozesse bewirken. Diese veränderten Einflüsse verändern das geochemische Milieu, welches seinerseits in Wechselwirkung mit den Einflüssen steht. Solche FEP werden unter dem FEP „Änderung des geochemischen Milieus“ zusammengefasst und als eine Einwirkung auf das Verschlussbauwerk betrachtet. Eine Änderung des geochemischen Milieus kann Alterationsprozesse beschleunigen und nimmt damit direkten Einfluss auf das geotechnische Verschlussbauwerk. Weitere FEP, die direkt von einer Temperaturveränderung beeinflusst werden, sind das FEP „Konvergenz“ und das FEP „Fluiddruck“. Während die Konvergenz durch eine Temperaturerhöhung positiv beeinflusst wird (höhere Konvergenzrate), wird der Fluiddruck durch die temperaturbedingte Volumenvergrößerung der Fluide und durch die Hohlraumverkleinerung infolge schnellerer Konvergenz erhöht, also negativ beeinflusst. Beide Einwirkungen beeinflussen sich gegenseitig, denn je größer die Konvergenzrate ist, desto größer wird der Fluiddruck, der der Konvergenz entgegenwirken kann.

Die Kategorie 4 umfasst die Einwirkungen auf ein geotechnisches Bauwerk, dessen Einwirkungsintensitäten indirekt durch eine Temperaturveränderung als Folge des Wärmeeintrags der eingelagerten radioaktiven Abfälle verändert werden. Hierzu gehören die FEP „Quellen des Bentonits“, „Nichtthermische Volumenänderung von Materialien“ und „Auflockerungszone“. Ein Quellen des Bentonits wird durch das Auftreten von Lösungen ausgelöst. Dabei ist u.a. der Aufbau eines gleichmäßigen Quelldruckes durch eine langsame Aufsättigung notwendig, um Umläufigkeiten in der Kontaktzone und einer lokalen Erosion zu verhindern (WEBER & KELLER 2006). Das Quellverhalten und die Höhe des Quelldruckes sind stark von der chemischen Zusammensetzung der auftretenden Lösungen abhängig (MÜLLER-HOEPPE & KRONE 1999). Eine wärmebeeinflusste Änderung der chemischen Zusammensetzung auftretender Lösung oder eine vorausgegangene vollständige Austrocknung könnte das Quellverhalten und -druckes beeinflussen. Ähnliche Beeinflussungen treten beim FEP „Nichtthermische Volumenänderung von Materialien“ auf, z.B. kann eine wärmebeeinflusste Änderung der Löslichkeit auftretender Lösung eine Veränderung von Korrosionsprozessen hervorrufen. Das FEP „Auflockerungszone“ wird z.B. indirekt durch die wärmebeeinflusste Änderung der Konvergenz beeinflusst. Das FEP „Quellen des Bentonits“ wird dem FEP „Nichtthermische Volumenänderung von Materialien“ zugeordnet.

Während die FEP der Kategorien 3 und 4 auch ohne eine Temperaturänderung ablaufen und durch diese nur in ihrer Ausprägung verändert werden, entstehen die Einwirkungen der Kategorie 5 nur, wenn Temperaturänderungen auftreten. Sie werden einerseits durch die Wärmeentwicklung aus dem eingelagerten radioaktiven Abfall, andererseits möglicherweise durch die von über Tage einwirkenden FEP, die im Zusammenhang mit einer Vereisung stehen, hervorgerufen. Hierzu gehören das FEP „Thermische Expansion/Kontraktion“ und das FEP „Thermische Spannungsänderung im Wirtsgestein“. Beide FEP-Einwirkungen können infolge der aus ihnen resultierenden Spannungsänderungen die Funktion der geotechnischen Barriere erheblich beeinflussen.

Die durchgeführte Kategorisierung zeigt, dass ein kleiner Teil der langzeitlichen Einwirkungen auf ein geotechnisches Bauwerk zeitlich begrenzt von über Tage auftritt, ein weiterer kleiner Teil völlig unbeeinflusst von anderen FEP abläuft und der größte Teil der Einwirkungen in ihrer Intensität von Temperaturveränderungen abhängen bzw. hervorgerufen werden. Deshalb ist es notwendig, besonders den zeitlichen Verlauf der Temperaturveränderungen und die FEP hinsichtlich ihres zeitlichen Auftretens zu prüfen, um eine konkretere Vorstellung über den Zeitrahmen zu bekommen, in denen die FEP-Einwirkungen verändert auf das Bauwerk einwirken (Kapitel 7.3).

Erosion			
Permafrost	Globale klimatische Veränderungen		Von über Tage einwirkende FEP
Randl. Inlandvereisung			
Vollst. Inlandvereisung			
Erdbeben	Erdbeben		
Diapirismus	Diapirismus	Unbeeinflusste FEP	
Wärmeproduktion	Wärmeproduktion		
Lösungszutritt ins Gb	Lösungszutritt ins Gb		
Konvergenz	Konvergenz		
Fluiddruck	Fluiddruck		
Geochem. Milieu	Änderung des geochemischen Milieus	direkt	
Ausfällung/Auflösung			
Inv.+ Korrosion Metalle		Wärmebeeinflusste FEP	Von unter Tage einwirkende FEP
Nichtherm. Volumenänderung	Nichtherm. Volumenänderung		
Quellen Bentonit		indirekt	
Auflockerungszone	Auflockerungszone		
Thermische SPÄ Wirtsgestein	Thermische SPÄ Wirtsgestein	durch Temperaturänderungen hervorgerufen	
Therm. Expansion/Kontraktion	Therm. Expansion/Kontraktion		

Abb. 17: Kategorien der festgelegten FEP-Einwirkungen,
Abkürzungen: Gb=Grubengebäude, Inv.=Inventar, SPÄ=Spannungsänderung, therm.=thermisch.

Eine Kategorisierung der ausgewählten FEP für einen Streckenverschluss mit einer Lebensdauer von 1.000 Jahren (Kapitel 7.1) nach übergeordneten FEP-Einwirkungen oder Gemeinsamkeiten der FEP untereinander ist in Abb. 18 und Abb. 19 dargestellt. Durch die eingeschränkte Lebensdauer entfallen einige FEP-Einwirkungen aus der obengenannten Kategorisierung. Da bereits bei der Standortsauswahl eines Endlagers hohe Diapirismusraten ausgeschlossen werden, kann das FEP „Diapirismus“ für einen solch kurzen Zeitraum vernachlässigt werden. Weiterhin können durch die begrenzt angenommene Lebensdauer auch die Einwirkungen von über Tage ausgeschlossen werden. Es wirken somit nur die Einwirkungen aus den Kategorien zwei bis fünf, die der Großgruppe ‚Einwirkungen, die unter Tage auftreten‘ zugeordnet werden (Abb. 18).

Erosion			
Permafrost	Globale klimatische Veränderungen		Von über Tage einwirkende FEP
Randl. Inlandvereisung			
Vollst. Inlandvereisung			
Erdbeben	Erdbeben		
Diapirismus	Diapirismus	Unbeeinflusste FEP	
Wärmeproduktion	Wärmeproduktion		
Lösungszutritt ins Gb	Lösungszutritt ins Gb		
Konvergenz	Konvergenz		
Fluiddruck	Fluiddruck		
Geochem. Milieu	Änderung des geochemischen Milieus	direkt	
Ausfällung/Auflösung			
Inv.+ Korrosion Metalle		Wärmebeeinflusste FEP	Von unter Tage einwirkende FEP
Nichtherm. Volumenänderung	Nichtherm. Volumenänderung		
Quellen Bentonit		indirekt	
Auflockerungszone	Auflockerungszone		
Thermische SPÄ Wirtsgestein	Thermische SPÄ Wirtsgestein	durch Temperaturänderungen hervorgerufen	
Therm. Expansion/Kontraktion	Therm. Expansion/Kontraktion		

Abb. 18: Darstellung der FEP-Einwirkungen für einen Streckenverschluss mit einer Lebensdauer von 1.000 Jahren in die Kategorisierungsgruppen nach Abhängigkeiten. Abkürzungen: Gb=Grubengebäude, Inv.=Inventar SPÄ=Spannungsänderung, therm.=thermisch. Grau: zu vernachlässigende FEP.

Für eine Überprüfung, welche FEP-Einwirkungen bei einer Vorbemessung eines Streckenverschlusses ausschlaggebend sind, werden die kategorisierten FEP auf mögliche Gemeinsamkeiten und Interaktionen überprüft. Aus den ausgewählten relevanten FEP-Einwirkungen für eine Vorbemessung eines Streckenverschlusssbauwerks mit einer Lebensdauer von 1.000 Jahren

(Kapitel 7.1) können sieben übergeordnete FEP-Einwirkungen identifiziert werden, die nach der Zusammenlegung einiger FEP für die weitere Betrachtung hinsichtlich ihres zeitlichen Auftretens (Kapitel 7.3) ausgewählt wurden (Abb. 19).

FEP-Einwirkungen	Übergeordnete FEP-Einwirkungen
Konvergenz	Konvergenz
Fluiddruck	Fluiddruck
Wärmeproduktion	Wärmeeinfluss durch radioaktive Abfälle
Therm. Expansion/Kontraktion	
Term. SPÄ Wirtsgestein	
Auflösung/Ausfällung	Änderung des geochem. Milieu
Geochem. Milieu	
Korrosion Metalle	
Lösungszutritt ins Grubengebäude	Lösungszutritt ins Grubengebäude
ALZ	wichtig
Erdbeben	Erdbeben
Nicht thermische induzierte Volumenänderung	Nicht thermische induzierte Volumenänderung
Quellen von Bentonit	

Abb. 19: Übergeordnete Einwirkungen durch die Zusammenfassung der FEP-Einwirkungen auf einen Streckenverschluss mit einer Lebensdauer von 1.000 Jahren und deren Abhängigkeiten (Pfeile). Abkürzungen: SPÄ=Spannungsänderung, ALZ=Auflockerungszone.

Während die FEP-Einwirkungen „Erdbeben“ und „Lösungszutritt ins Grubengebäude“ aus der Kategorie „unbeeinflussbare Einwirkungen unter Tage“ weiterhin als eigenständig gelten, wird das FEP „Wärmeproduktion“ mit den FEP aus der Kategorie „Einwirkungen, die unter Tage durch den Wärmeeinfluss aus den radioaktiven Abfällen hervorgerufen werden“ der übergeordneten FEP-Einwirkung „Wärmeeinfluss durch radioaktive Abfälle“ zugeordnet. Die Zusammenlegung basiert auf dem Gesichtspunkt, dass die FEP „Thermische Spannungsänderung im Wirtsgestein“ und „Thermische Expansion/Kontraktion“ ohne die Wärmeentwicklung aus den radioaktiven Abfällen in diesem Zeitrahmen nicht auftreten würden. Im Gegensatz dazu stehen die FEP, die den Kategorien „Einwirkungen, die direkt und indirekt durch die Wärmeentwicklung der radioaktiven Abfälle beeinflusst werden“, zugeordnet werden. Diese FEP-Einwirkungen können zwar durch die Wärmeentwicklung in ihrer Ausprägung beeinflusst werden, doch treten sie auch ohne die Wärmeentwicklung auf. Daher werden die FEP-Einwirkungen „Konvergenz“, „Fluiddruck“ und „Nicht thermische Volumenänderung“ als eigenständige Einwirkungen gesehen, wobei der Einfluss durch die abgebende Wärme aus den radioaktiven Abfällen in Hinblick auf mögliche Intensivierungen dieser Einwirkungen bei der Auslegung des Streckenverschlussbauwerks berücksichtigt werden muss. Ebenso muss bei der übergeordneten FEP-Einwirkung „Änderung des geochemischen Milieus“ eine Intensitätsveränderung berücksichtigt werden, da sie ebenso wie der Fluiddruck und die Konvergenz direkt durch den Wärmeeintrag aus den radioaktiven Abfällen bestimmt wird. Die in dieser Einwirkung enthaltenen FEP werden wie in Abb. 18 zusammengefasst, da die FEP „Auflösung/Ausfällung“ und „Korrosion Metalle“ das FEP „Geochemisches Milieu im Grubenbau“ beeinflussen. Abhängigkeiten zwischen FEP können nicht nur innerhalb einer übergeordneten Einwirkung auftreten, sondern auch zwischen den aufgestellten übergeordneten Einwirkungen. Die vorherrschenden Abhängigkeiten zwischen den übergeordneten Einwirkungen sind durch Pfeile in

Abb. 19 gekennzeichnet. Die Abhängigkeiten werden an dieser Stelle vereinfacht dargestellt. Ausführlichere Betrachtungen von Interaktionen bzw. Abhängigkeiten der festgelegten FEP-Einwirkungen sind in Kapitel 7.4 zu finden. Neben der bereits erläuterten Abhängigkeit zwischen Konvergenz und Fluiddruck tritt eine weitere wichtige Abhängigkeit zwischen dem FEP „Wärmeeinfluss durch radioaktive Abfälle“ und dem FEP „Änderung des geochemischen Milieus“ auf. In diesem Zusammenhang spielen besonders die durch Temperaturveränderungen intensivierten/reduzierten Auflösungs- und Ausfällungsprozesse für die Einhaltung der Sicherheitsfunktion und damit auch für die Auslegung des Verschlussbauwerks eine große Rolle. Die FEP-Einwirkung „Lösungszutritt ins Grubengebäude“ beeinflusst durch die vergrößerte Menge an vorhandenen Lösungen den anstehenden Fluiddruck und sämtliche FEP, die zur Änderung des geochemischen Milieus beitragen und im Zusammenhang mit dem FEP „Nicht thermische Volumenänderung“ stehen.

Weitere Kategorisierungsansätze

Neben der Kategorisierung nach Abhängigkeiten wurden noch drei weitere Kategorisierungsansätze verfolgt, um die FEP-Einwirkungen hinsichtlich von Gemeinsamkeiten oder übergeordneten Einwirkungen zusammenführen zu können:

Kategorisierung mit Fokus auf den Intensitätsgrad

Ziel dieser Kategorisierung war es, die FEP zu identifizieren, die Ausprägungsveränderungen von FEP-Einwirkungen hervorrufen. Die Kategorisierung sollte die FEP nach Einflussgröße auf den Intensitätsgrad der veränderten Einwirkungen veranschaulichen. Aufgrund der vielfältigen Wechselbeziehungen zwischen den FEP und besonders der fehlenden Datengrundlage bezüglich Auftreten und genereller Wirkungsstärke mehrerer beeinflussender FEP schlug dieser Kategorisierungsansatz fehl. Intensivierungen von FEP-Einwirkungen durch andere FEP, die zur selben Zeit auftreten, sind bei einer Bauwerksauslegung jedoch von großer Bedeutung (vgl. Kapitel 7.4).

Kategorisierung nach der Art der Auswirkung

FEP-Einwirkungen können durch mechanische, hydraulische, chemische oder thermische Prozesse hervorgerufen werden. Ansatzpunkt dieser Kategorisierung war die Fragestellung, in welcher Art und Weise die FEP-Einwirkungen auf ein geotechnisches Verschlussbauwerk einwirken und welche Auswirkungen daraus resultieren. Ergebnis dieser Betrachtung ist, dass alle FEP-Einwirkungen zwei Kategorien zugeordnet werden können (Tab. 3, Spalte 3): Einerseits die FEP-Einwirkungen, die mechanisch auf ein geotechnisches Verschlussbauwerk einwirken und die Spannungsänderungen hervorrufen, andererseits die FEP-Einwirkungen, die chemisch auf ein geotechnisches Verschlussbauwerk einwirken und damit zur Alterung des Bauwerks beitragen. Eine Kategorisierung, bei denen die FEP nur zwei Kategorien zugeordnet werden können, wird als nicht zielführend angesehen.

Kategorisierung hinsichtlich einer Bemessungssituation

Der Grundgedanke dieser Kategorisierung ist, eine Einordnung der FEP-Einwirkungen in Anlehnung an den Eurocode zu schaffen. Tab. 3 zeigt die Einordnung der FEP-Einwirkungen nach:

- der Art ihrer Entstehung (mechanisch, chemisch, thermisch),
- der Art der Einwirkung auf die geotechnische Barriere (mechanisch, chemisch, thermisch), dem zeitliche Verlauf des Auftretens (kurzfristig, dauerhaft, variabel, periodisch, sukzessiv),
- der Abhängigkeit von anderen FEP (ja/nein),

Tab. 3: Kategorisierungsansatz hinsichtlich einer Bemessungssituation.

FEP-Name	Seitens der Entstehung M=Mech, C=chem, T=therm	Art der Einwirkung auf Barriere M=Mech, C=chem, T=therm	Auftreten K=kurzfristig, D=dauerhaft, V=variabel, P=periodisch, S=sukzessiv	Abhängigkeiten X=Ja	Zeit des Auftretens F=Früh, M=mittel S=spät, I=immer	Zeit Kulminierend X=möglich	Einwirkungen D=Dynamisch, S=statisch	Häufigkeit des Auftretens S=Ständig, W=Wiederkehrend, A=Außergewöhnlich
Erdbeben	M	M	K	----	I	----	D	A
Erosion	M+C	M	D	X	I	X	S	S W
Diapirismus	M	M	D	----	I	----	S	S
Permafrost, Inlandvereisung (vollständig/randliche)	T	M	V P	----	S	----	D S	W
(Inventar Metalle &) Metallkorrosion	C+T	C	V	X	F M	----	S	
Konvergenz		M	V	(X)	I	----	S	S W
Fluiddruck		M	V	X	I	----	S	S W
Nicht therm. induzierte Volumenänderung von Materialien	C	M	V	X	F M	----	S	
Lösungszutritt ins Grubengebäude	M	M C	V	----	I	----	D S	
Quellen des Bentonits	C T	M	V	----	F	----	S	W
Geochemisches Milieu im Grubenbau	C T	C	D (S)	X	I	----	S	S
Auflösung/Ausfällung	C T	C	V D	(X)	I	X	S	W
Thermische Expansion oder Kontraktion	T	M	V (P;S)	X	F S	X	S	
Thermisch bedingte Spannungumlagerung im Wirtsgestein	T	M	V	X	F S	X	S	

- der Zeit des Auftretens (früh, mittel, spät),
(Dabei wird folgende grobe Einordnung vorgenommen. Der Zeitpunkt ‚spät‘ wird dem Einsetzen zukünftiger Vereisungsphase zugeordnet. Der Zeitpunkt ‚früh‘ umfasst den Zeitraum unmittelbar nach dem Einbringen des wärmeentwickelnden Abfalls über die Phasen der Erwärmung des Gebirges infolge der Abfälle bis zum Einstellen einer annähernden ‚Normaltemperatur‘. Der Begriff ‚mittel‘ beschreibt die Zeitphase zwischen ‚früh‘ und ‚spät‘.)
- dem Hinweis auf ein zeitlich kulminierendes Auftreten,
(Diese Einordnung zeigt, ob eine Einwirkung einen Höhepunkt erreichen kann.)
- der Art der Einwirkung (dynamisch, statisch) und
- der Häufigkeit des Auftretens (ständig, wiederkehrend, außergewöhnlich).

Eine aussagekräftige Kategorisierung konnte mit diesem Ansatz zwar nicht erzielt werden, dennoch ist die Kenntnis über die Art der Einwirkungen (dynamisch, statisch), deren Wirkungsweise und die Häufigkeit des Auftretens für eine Bauwerksauslegung von großer Bedeutung (Kapitel 8.1.2).

7.3 Betrachtung der FEP hinsichtlich ihres zeitlichen Auftretens

Die Kenntnis über das zeitliche Auftreten der FEP gibt darüber Aufschluss, welche FEP-Einwirkungen zu welchen Zeitpunkten die geotechnische Barriere beeinflussen könnten. FEP, die in derselben Zeitspanne auftreten, werden bezüglich ihrer Interaktionsmöglichkeiten untereinander auf Intensivierungen oder Abschwächungen eingehender betrachtet.

In diesem Kapitel werden Zeitabschnitte festgelegt, die auf dem übergeordnet beeinflussenden FEP „Wärmeentwicklung durch radioaktive Abfälle“ basieren. Die ausgewählten FEP-Einwirkungen werden diesen Zeitphasen zugeordnet. Dies ermöglicht eine zeitliche Übersicht über die FEP-Einwirkungen, die gleichzeitig oder separat auftreten. Beeinflussungen durch gleichzeitig auftretende FEP-Einwirkungen werden am Beispiel der FEP-Einwirkungen auf ein Streckenverschlussbauwerk mit einer Lebensdauer von 1.000 Jahren erläutert.

Im Kapitel 7.2 (Abb. 16) wurde festgestellt, dass ein Großteil der FEP-Einwirkungen auf ein geotechnisches Verschlussbauwerk durch Temperaturänderungen hervorgerufen oder in ihrer Ausprägung verändert werden können. Temperaturänderungen stehen entweder mit der Wärmeentwicklung der eingelagerten radioaktiven Abfälle oder mit der Abkühlung durch globale Klimaänderungen (Inlandvereisungen) im Zusammenhang. Für einen Betrachtungszeitraum von 1.000 Jahren spielt nur die Wärmeentwicklung durch den radioaktiven Abfall eine Rolle. Die dadurch hervorgerufenen Temperaturveränderungen könnten am geotechnischen Verschlussbauwerk Alterationsprozesse beschleunigen oder Rissbildungsprozesse durch Spannungsänderungen bzw. -umlagerungen hervorrufen und sind daher entscheidend bei einem Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweis. Um mögliche Intensivierungen der Einwirkungen auf die geotechnische Barriere abschätzen zu können, ist die Kenntnis über die Wärmeentwicklung und -ausbreitung im Endlager ausschlaggebend. Die Wärmeentwicklung, -ausbreitung und möglicherweise -überlagerung sind abhängig vom Endlagerkonzept und vom Einlagerungsinventar (Kapitel 9.1). Mögliche Auswirkungen durch Temperaturänderungen (Intensivierung von Einwirkungen) auf ein Verschlussbauwerk stehen im Zusammenhang mit der Lage des Verschlusses (Entfernung zur Wärmequelle) sowie der Wärmeleitfähigkeit des Wirtsgesteins und der Materialien des Verschlussbauwerks (Zusammensetzung des Salzes und des Materials).

In dieser Arbeit wird für eine Vorbemessung eines Verschlussbauwerks die Kenntnis von vier Zeitpunkten der Wärmeentwicklung und -ausbreitung als notwendig erachtet. Die Zeitpunkte

beschreiben wichtige Entwicklungspunkte der auftretenden Temperatur, wodurch eine Erfassung von Temperatur- und Zeitwerten möglich wird. Aufbauend auf diesen Ergebnissen kann eine Ableitung erfolgen, auf welche Art und Weise auftretende Einwirkungen in den jeweiligen Zeiträumen beeinflusst werden. Der erste Zeitpunkt (Zeitpunkt t_1) entspricht dem Zeitpunkt der beginnenden Wärmeentwicklung im Nahfeld des Einlagerungsbereiches. Die dadurch entstehenden Temperaturveränderungen können Spannungsänderungen hervorrufen, die bereits Auswirkungen im Bereich des Verschlussbauwerks nach sich ziehen könnten. Der zweite Zeitpunkt (t_2) ist der Zeitpunkt, bei dem die ersten messbaren Temperaturänderungen am Verschlussbauwerk auftreten. Zu diesem Zeitpunkt kann mit einer Veränderung des geochemischen Milieus und mit Spannungsänderungen durch die beginnende Expansion der Verschlussmaterialien und des umgebenden Salzgesteins gerechnet werden. Wodurch eine Intensivierung der Alteration (Auflösung/Ausfällung) und Rissbildungsprozesse einsetzen könnte. Der dritte Zeitpunkt (t_3) ist der Zeitpunkt bei dem die maximal mögliche Temperatur am Verschlussbauwerk auftritt (t_3). Die Zustände zu diesem Zeitpunkt sind entscheidend für die Auslegung. Wesentlich ist zunächst die Kenntnis der maximalen Temperaturerhöhung. Davon ausgehend können die Änderung des geochemischen Milieus und die maximale Ausdehnung der Materialien und des Salzes sowie deren gegenseitiges Verhalten bei ihrer Ausdehnung abgeschätzt werden. Der Zeitpunkt t_4 ist der Zeitpunkt, bei dem die Temperatur soweit gesunken ist, dass sich wieder die ursprünglichen Temperaturbedingungen in der Umgebung des Verschlussbauwerks eingestellt haben. Im Zeitraum zwischen t_3 und t_4 kann sich mit sinkender Temperatur das geochemische Milieu (Ausfällung- und Auflösungserscheinungen) ändern und die zuvor ausgedehnten Materialien und das Salzgestein verkleinern wieder ihr Volumen. Die dadurch entstehenden Zugspannungen sind besonders im Hinblick auf die ggf. verstärkten Alterationsprozesse infolge einer Änderung des geochemischen Milieus hinsichtlich der Verhinderung von Rissbildungen von Interesse.

Die oben beschriebenen Zeitpunkte geben Auskunft über die Zeitpunkte wann eine Temperaturerhöhung an welchen Ort auftritt und welche maximale Höhe sie erreichen kann. Zugehörige Daten können nur aus einer Modellierung gewonnen werden.

Temperaturberechnungen bzw. Simulationen für ein Endlager mit wärmeentwickelndem Einlagerungsinventar wurden z.B. von DELISLE (1980), ENGELMANN ET AL. (1993) und BOLLINGERFEHR ET AL. (2012) durchgeführt. Diese beziehen sich auf die Wärmeentwicklung im Einlagerungsbereich und betrachten teilweise die großflächige Wärmeausbreitung im gesamten Salzkörper.

Die Temperaturberechnungen von DELISLE (1980) zeigen einen relativ schnellen Temperaturanstieg, bei dem die maximale Temperatur von 150 °C nach ca. 100 Jahren erreicht wird (Abb. 20). Nach 500 Jahren fallen die Temperaturen auf Werte um 80 °C, während immer weitere Bereiche im Fernfeld des Einlagerungsbereiches einer Erwärmung unterliegen. Diese Erwärmung bewirkt bereits nach 300 Jahren eine Temperaturerhöhung am Gipshut. Nach 1.000 Jahren liegen die Temperaturen im Einlagerungsbereich bei 60 °C. Nach ca. 2.200 Jahren wird am Gipshut die maximale Temperaturerhöhung von ca. 7 °C, nach 5.000 Jahren an den Flanken des Salzstockes (bis 3 °C) eintreten. Im Einlagerungsbereich liegen nach ca. 5.000 Jahren Temperaturen von 40 °C bis 45 °C vor. Die Berechnungen ergeben, dass auch nach 20.000 Jahren keine völlige Rückkehr des Temperaturfeldes in den Ausgangszustand erreicht werden wird.

Die Temperaturberechnungen von ENGELMANN ET AL. (1993) wurden in mehreren Varianten mit jeweils anderem Einlagerungsinventar durchgeführt. Die Berechnungen ergeben, dass die Maximaltemperatur im Einlagerungsbereich nach ca. 80 Jahren erreicht wird (Abb. 20). Nach dem Erreichen der maximalen Temperatur sinkt die Temperatur rasch ab. Je nach Einlagerungskonzept für HLW-Abfälle liegen nach ENGELMANN ET AL. (1993) nach 500 bis 1.000 Jahren Temperaturen zwischen 90 °C und 50 °C im Einlagerungsbereich vor. Weiterhin wird eine zweite Temperaturerhöhung infolge von Überlagerungen nach ca. 2.000 Jahren festgestellt. Eine völlige Rückkehr des

Temperaturfeldes in den Ausgangszustand liegt je nach Einlagerungskonzept nach ca. 7.500, 11.000 oder 35.000 Jahren vor.

In den Untersuchungen von BOLLINGERFEHR ET AL. (2012) wurden Temperaturberechnungen mit dem derzeitigen Endlagerkonzept für Gorleben durchgeführt. Dabei wurden zwei Einlagerungsmethoden (Streckenlagerung, Bohrlochlagerung) bei den Modellierungen berücksichtigt. Als Ergebnis für die Streckenlagerung (Abb. 20 schwarz) zeigen sich unterschiedliche Temperaturhöhen an verschiedenen Stellen im Einlagerungsbereich. Ca. 25 Jahre nach Einlagerungsbeginn beginnt der Temperaturanstieg, der nach ca. 60-80 Jahren das gesamte Steinsalz innerhalb des Einlagerungsfeldes auf mindestens 110 °C und maximal fast 200 °C aufgeheizt hat. Nach diesem schnellen Temperaturanstieg klingt die Temperatur sehr langsam ab. Nach ca. 600 Jahren liegt die Temperatur an bestimmten Stellen im Einlagerungsbereich noch immer bei ca. 140 °C, nach 1.000 Jahren bereits bei ca. 115 °C. Dieser langsame Temperaturabfall innerhalb der ersten 600 Jahre ist auch auf Temperaturfeldüberlagerungen aufgrund der in unterschiedlichen Zeiträumen eingebrachten Abfälle zurückzuführen, was sich aus einem angedeuteten zweiten Temperaturmaximum ableiten lässt. Anschließend sinkt die Temperatur schneller ab, bis sie nach 10.000 Jahren einen Wert von ca. 58 °C erreicht hat. Am Salzspiegel zeigt sich nach ca. 300 Jahren eine Temperaturveränderung. Die Berechnungen ergaben, dass sich die Temperatur langsam und kontinuierlich erhöht und ein Maximum von ca. 33 °C nach ca. 2.000 bis 3.000 Jahren erreicht wird, was eine maximale Erwärmung des Salzspiegels um 9 °C bedeutet. Bei der Bohrlochlagerung setzt eine Erhöhung der Temperatur im Einlagerungsbereich nach ca. 10 bis 20 Jahren ein. Nach spätestens 25 Jahren ist im mittleren Einlagerungsbereich die Temperatur auf ca. 100 °C gestiegen. Nach einer kurzen Stagnation erhöht sich die Temperatur weiter, bis sie ca. 200 Jahre nach Einlagerungsbeginn ihr Maximum von ca. 193 °C im Zentralbereich erreicht. Die Maximaltemperatur hält ca. 200 Jahre an, bevor sie langsam zu sinken beginnt. Der lange Zeitraum lässt sich als eine Folge der Wärmeleistung von wärmeentwickelnden Abfällen beschreiben. Dieser Einfluss macht sich noch weitere 500 Jahre durch einen langsamen Rückgang der Temperatur bemerkbar. Nach ca. 1.000 Jahren liegt die Temperatur bei einem Wert um ca. 150 °C und damit ca. 35 °C höher als zum gleichen Zeitpunkt bei der Streckenlagerung. Danach fällt die Temperatur rascher ab, bis sie nach ca. 10.000 Jahren mit ca. 65 °C ähnliche Temperaturen wie in der Streckenlagerung erreicht. Eine Erwärmung am Salzspiegel tritt nach ca. 600 Jahren ein und erreicht nach ca. 2.000 bis 4.000 Jahren eine maximale Temperatur von ca. 32 °C, wodurch eine Temperaturänderung von ca. 8 °C festgestellt werden kann.

Der graphische Vergleich der Temperaturverläufe von DELISLE (1980), ENGELMANN ET AL. (1993) und BOLLINGERFEHR ET AL. (2012) in Abb. 20 zeigt eine ungefähre Übereinstimmung im zeitlichen Verlauf der Temperaturentwicklung, obwohl in den verschiedenen Berechnungen unterschiedliche Einlagerungsinventare zugrunde liegen und voneinander abweichende Randparameter in den Berechnungen verwendet werden. Letzteres ist auch der Grund dafür, dass die einzelnen errechneten Maximaltemperaturen voneinander abweichen. In den Grafiken wird nur der Trend des Temperaturverlaufs qualitativ wiedergegeben, auf eine quantitative Darstellung und entsprechende Skalierung der Ordinaten wurde verzichtet. Dieser Trend zeigt, dass innerhalb der ersten 100 bis 200 Jahren nach Einlagerungsbeginn die maximale Temperatur im Einlagerungsbereich erreicht wird (veranschaulicht durch die Intervalldarstellung im unteren Bereich der Abb. 20). Während aus den Berechnungen von DELISLE (1980), ENGELMANN ET AL. (1993) und dem Streckenlagerungsmodell von BOLLINGERFEHR ET AL. (2012) hervorgeht, dass die aus den eingelagerten Abfällen resultierende Maximaltemperatur nach ca. 100 Jahren erreicht wird, zeigt sich beim Bohrlochlagerungsmodell von BOLLINGERFEHR ET AL. (2012) eine zeitliche Verschiebung von zusätzlich ca. 100 Jahren. Ein weiterer Unterschied ist die Dauer des Vorliegens der berechneten Maximaltemperaturen. Während bei DELISLE (1980) und ENGELMANN ET AL. (1993) nach ca. 500 Jahren nach Einlagerungsbeginn die Temperatur auf ca. 80 °C wieder weitestgehend

abgesunken ist, stellt sich solch eine Temperatur nach den neueren Berechnungen von BOLLINGERFEHR ET AL. (2012) erst nach ca. 2.000 Jahren, bei der Bohrlochlagerung sogar erst nach ca. 4.000 Jahren nach Einlagerungsbeginn ein. Die hohe Temperatur hält damit länger an. Durch die eingeschränkte Berechnungsdauer von 10.000 Jahren kann allerdings keine Aussage über den Zeitpunkt gemacht werden, bei dem die Temperatur wieder einem nahezu identischen Wert der ursprünglichen Gebirgstemperatur entspricht.

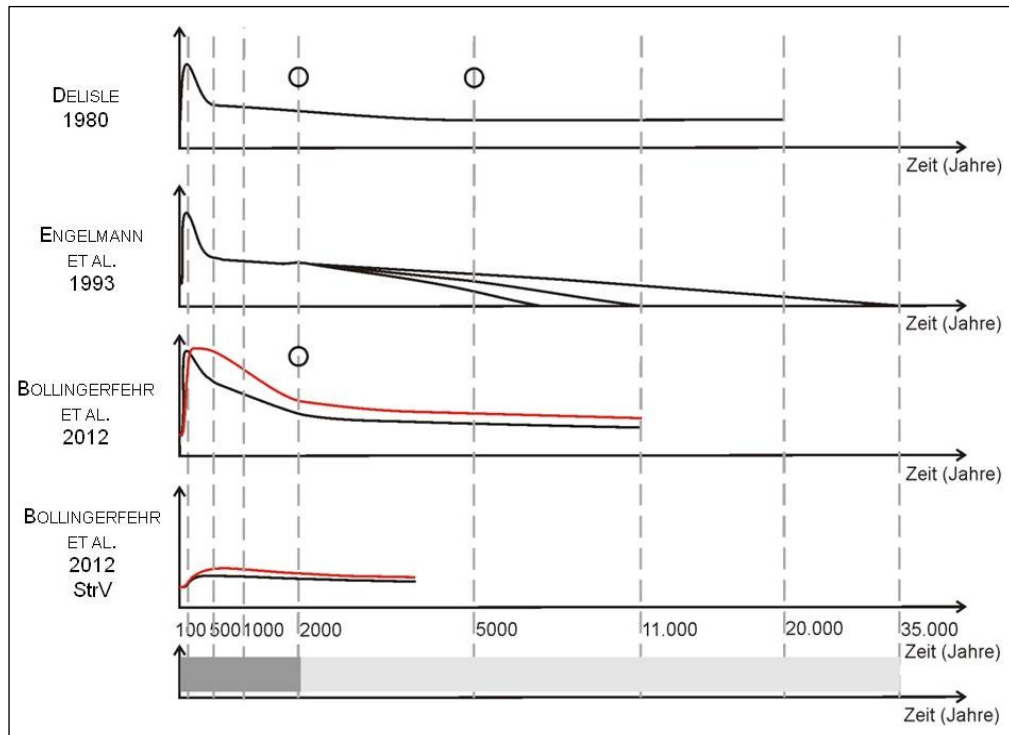


Abb. 20: Qualitative Darstellung der Wärmeentwicklungsverläufe im Einlagerungsbereich und am Streckenverschlussbauwerk (StrV) (basierend auf DELISLE 1980 / ENGELMANN ET AL. 1993 / BOLLINGERFEHR ET AL. 2012). Die Kreise kennzeichnen die berechneten Zeitpunkte der maximalen Temperatur am Gipshut und an den äußeren Bereichen des Salzstocks.

Neben der Temperaturentwicklung im Einlagerungsbereich führten BOLLINGERFEHR ET AL. (2012) auch Temperatursimulationen für ein dem Einlagerungsbereich nahegelegenes Streckenverschlussbauwerk durch. An dieser Stelle wird nur der zeitliche Temperaturverlauf diskutiert, detaillierte Angaben über die Ergebnisse der Temperaturberechnungen finden sich in Kapitel 9.1. Die Temperaturverläufe für die Modelle Streckenlagerung und Bohrlochlagerung (Abb. 20-BOLLINGERFEHR ET AL. 2012 StrV) erreichen ihre Maximaltemperaturen nach 500 Jahren (Streckenlagerung) bzw. nach 750 Jahren (Bohrlochlagerung) nach Einlagerungsbeginn. Das bedeutet, dass das Erreichen der Maximaltemperatur im Bereich der geotechnischen Streckenverschlussbauwerke erst ca. 400 bis 550 Jahre nach dem Erreichen der Maximaltemperatur im Einlagerungsbereich auftritt. Der degressive Temperaturanstieg und die zeitliche Verschiebung des Temperaturmaximums sind eine Folge des Abstandes zur Wärmequelle. Der unterschiedliche Verlauf der beiden Temperaturkurven am Streckenverschlussbauwerk beruht auf den zugrunde gelegten unterschiedlichen Konzepten der Einlagerung. Durch die eingeschränkten Berechnungszeiträume kann nicht nachvollzogen werden, ob der Temperaturabfall am Streckenverschluss mit einer ähnlichen zeitlichen Verschiebung auftritt, wie sie sich bei den Maximaltemperaturen zeigt.

Anhand der Temperaturentwicklungsverläufe in Abb. 20 und unter Hinzuziehung späterer globaler klimatischer Veränderungen erfolgt eine Einteilung in vier Temperaturphasen, in denen Temperaturveränderungen FEP-Einwirkungen auf ein geotechnisches Verschlussbauwerk

unterschiedlich beeinflussen (Abb. 21). Dabei wird eine zeitliche Einordnung vorgenommen, die aus den vorliegenden Daten abgeleitet wurde, aber für eine Vorbemessung unter Einbezug des jeweiligen Einlagerungskonzeptes durch Modellierungen überprüft werden muss. An dieser Stelle werden nur die Ergebnisse der Temperaturfeldberechnungen von BOLLINGERFEHR ET AL. (2012) für das Einlagerungskonzept der Streckenlagerung betrachtet.

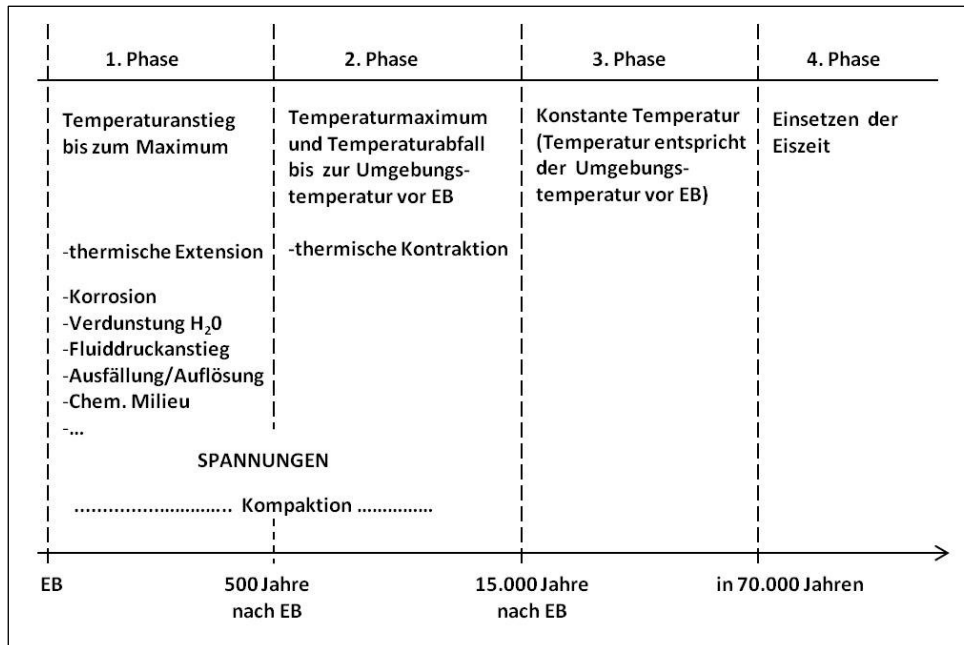


Abb. 21: Temperaturphasen, in denen Temperaturveränderungen die FEP-Einwirkungen auf ein geotechnisches Verschlussbauwerk unterschiedlich beeinflussen. Abkürzungen: EB=Einlagerungsbeginn

1. Temperaturphase: Temperaturanstieg bis zur Maximaltemperatur (Einlagerungsbeginn bis ca. 500 Jahre nach Einlagerungsbeginn, t_1 bis t_3)

Gemäß der Modellrechnungen von DELISLE (1980), ENGELMANN ET AL. (1993) und denen zur Streckenlagerung von BOLLINGERFEHR ET AL. (2012) wird die maximale Temperatur im Einlagerungsbereich ca. 100 Jahre nach Einlagerungsbeginn erreicht. Die von BOLLINGERFEHR ET AL. (2012) durchgeführten Berechnungen zeigen, dass eine maximale Temperatur an einem untertägigen Streckenverschlussbauwerk nach ca. 500 Jahren erreicht wird. In dieser ersten Phase bewirkt der Temperaturanstieg eine thermische Expansion des Salzgesteins und ggf. der Verschlussmaterialien. Des Weiteren können durch einen Temperaturanstieg viele andere Prozesse (z.B. Korrosion, Verdunstung, Fluidruckanstieg, Auflösung) intensiviert werden, die eine Veränderung des geochemischen Milieus hervorrufen und damit die Alteration des Verschlussbauwerks beschleunigen.

2. Temperaturphase: Temperaturabfall bis zur Ursprungstemperatur (ab ca. 500 bis ca. 15.000 Jahre nach Einlagerungsbeginn)

Nach Erreichen der Maximaltemperatur klingt die Temperatur langsam ab. Je nach Einlagerungskonzept und -inventar können nach den vorliegenden Berechnungen bis zu 35.000 Jahre vergehen, bis die ursprüngliche Temperatur im Einlagerungsbereich wieder erreicht wird. Aus dem sehr flach abfallenden Temperaturkurvenverlauf der Berechnungen von BOLLINGERFEHR ET AL. (2012) ist anzunehmen, dass das zeitlich Erreichen der Ursprungstemperatur über die 35.000 Jahre hinausgehen wird. Die Entwicklung der Temperatur an einem Streckenverschlussbauwerk ist in der Studie von BOLLINGERFEHR ET AL. (2012) nur für einen Zeitraum von 4.000 Jahren dargestellt. Am Ende dieser Zeit liegt eine Temperatur von

ca. 48 °C vor. Zu welchem Zeitpunkt Temperaturbedingungen vorliegen, wie sie vor der Einlagerung herrschten, kann an dieser Stelle daher nur abgeschätzt werden. Wird ein weiterer kontinuierlicher linearer Temperaturabfall vorausgesetzt, könnte nach ca. 13.000 Jahren annähernd die ursprüngliche Gebirgstemperatur erreicht sein. Unter Berücksichtigung eines konservativen Sicherheitszuschlages von 2.000 Jahren wird der Endpunkt dieser Phase vorerst bei 15.000 Jahren festgelegt, was im Zuge von Modellierungsarbeiten unter Berücksichtigung des endgültigen Endlagerkonzeptes überprüft werden muss.

In der zweiten Zeitphase sind zwei Aspekte für die Auslegung eines untertägigen Bauwerkes wichtig. Zum einen ist die Betrachtung des Zeitraums bedeutsam, bei dem das Verschlussbauwerk der Maximaltemperatur ausgesetzt ist. In diesem Fall ist dies ein Zeitabschnitt von ca. 250 Jahren. Zum anderen ist die Zeitspanne von maßgeblicher Bedeutung, bei der die Temperatur absinkt und damit andere, im Vergleich zu Phase 1 teilweise entgegengesetzte Einwirkungen hervorgerufen werden.

Die elementarste Einwirkung auf ein Verschlussbauwerk in dieser Phase ist die aus der Temperatursenkung resultierende thermische Kontraktion der Materialien des Verschlussbauwerks und des umgebenen Salzgesteins. Die mit einer Kontraktion verbundenen Zugspannungen dürfen, besonders unter Einbezug einer in Phase 1 möglichen intensivierten Alteration des Verschlussbauwerks, die Rissfestigkeit nicht überschreiten. Außerdem ist zu untersuchen, ob die konkurrierenden Prozesse Kontraktion und Expansion zu einer Vergrößerung der Kontaktzone zwischen den Bauwerksmaterialien und dem Salzgestein führen können.

In der Phase 2 könnte sich auch das geochemische Milieu verändern, da durch die abfallende Temperatur eine Verminderung der Lösungsfähigkeit von anstehenden Lösungen möglich ist. In diesem Zusammenhang besteht die Möglichkeit von Ausfällungen im Bereich des Bauwerks.

3. *Temperaturphase*: Konstante Temperatur (ab ca. 15.000 nach Einlagerungsbeginn bis ca. 70.000 Jahre)

Nach ca. 15.000 Jahren hat die Temperaturbeeinflussung aus den eingelagerten radioaktiven Abfällen soweit abgenommen, dass sich im Bereich der Streckenverschlüsse annähernd wieder die Ursprungstemperaturen vor Einlagerungsbeginn eingestellt haben (siehe zweite Temperaturphase). In dieser Zeit ist von keinen weiteren Temperaturschwankungen auszugehen, die Einwirkungen an einen Streckenverschluss auslösen bzw. erheblich beeinflussen würden.

4. *Temperaturphase*: Globale klimatische Veränderungen (ab ca. 70.000 Jahre)

Die vierte Phase, in denen FEP-Einwirkungen auf ein geotechnisches Verschlussbauwerk durch Temperaturveränderungen beeinflusst werden, beginnt mit dem Einsetzen der Kaltzeiten bzw. Vereisungen (in ca. 70.000 Jahren). Neben Auflaständerungen durch aufliegende Gletscher kann es durch eine äußere Abkühlung infolge eines Permafrosts zu kryogenen Kontraktionsrissen und zu einem generellen Absinken der Temperatur in den oberen Bereichen des Salzstockes kommen, die auch in tieferen Bereichen Spannungsänderungen hervorrufen können. Eine zeitliche Festlegung des Beginns dieser Phase erweist sich als schwierig. Durch eine Extrapolation aus den Klimaverläufen der Vergangenheit und der Berücksichtigung der Milankovitch-Zyklen kann ein ungefährender Zeitpunkt einer erneuten Vergletscherung Norddeutschlands abgeschätzt werden. Dieser kann sich aber durch den Einfluss der durch den Menschen beschleunigten Klimaerwärmung verschieben. In diesem Bericht wird ein Einsetzen einer erneuten Vereisung in frühestens 70.000 Jahren angenommen.

Die Festlegung der Phasen, in denen Temperaturveränderungen Einwirkungen auf ein geotechnisches Verschlussbauwerk beeinflussen bzw. auslösen, dient als Grundlage für eine weitergehen-

de Klassifizierung. Diese Klassifizierung umfasst eine Einteilung der nächsten 200.000 Jahre¹³ in vier Zeitabschnitten denen die FEP-Einwirkungen nach ihrem zeitlichen Auftreten zugeordnet werden (Tab. 4). Die zeitliche Einordnung des Auftretens der FEP-Einwirkungen und deren möglicher Änderungen (insbesondere Intensivierungen) stellen einen notwendigen Zwischenschritt zur Erweiterung der Nachweiszeiträume aus der ingenieurtechnischen Auslegung von max. 100 Jahren dar.

Die erste Phase ist die *Betriebsphase* oder die Phase der Bauzustände. Sie umfasst die Zeitspanne von der Errichtung bis zum Verschluss des Endlagers. Ihr zugehörig ist neben der Auffahrung des Bergwerkes, der Einlagerung der radioaktiven Abfälle und dem Einbringen von Versatzmaterial auch der Bau von Verschlussbauwerken. Die Betriebsphase endet mit dem Verschluss des Endlagers nach ca. 40 Jahren (BOLLINGERFEHR ET AL. 2011). Die sich anschließende *Transiente Phase* umfasst den Zeitraum, in dem durch die eingelagerten hochradioaktiven Abfällen Temperaturänderungen (Anstieg und Abfall) hervorgerufen werden. Sie umfasst die Temperaturphasen 1 und 2 aus Abb. 21. Da die Abfälle bereits während der Einlagerung Wärme entwickeln, überschneidet sich diese Phase eigentlich mit der Betriebsphase. Da aber die Auswirkungen infolge des Temperatureinflusses verstärkt in der Nachverschlussphase einsetzen und zu diesem Zeitpunkt auch keine Nachbesserung mehr möglich ist, wird das Einsetzen der Transienten Phase mit dem Verschluss des Endlagers festgelegt. Erste Temperaturveränderungen setzen am Streckenverschlussbauwerk nach ca. 25 Jahren ein (vgl. Kapitel 9.1). Maximaltemperaturen im Bereich der Wärmequelle werden ca. 100 Jahre, am Bauwerk selbst ca. 500 Jahre nach Einlagerungsbeginn erreicht. Ein Temperaturabfall setzt ca. 750 Jahren nach Einlagerungsbeginn ein. Die *Monoton/Stationäre Phase* beginnt, wenn die Temperatur im Einlagerungsbereich ihre Ausgangstemperatur wieder erreicht hat. Der Zeitpunkt entspricht dem Ende der zweiten Phase der Temperaturveränderungen bei ca. 15.000 Jahren. Nach diesem Zeitpunkt werden die Temperaturen weitestgehend der Gebirgstemperatur vor Einlagerungsbeginn entsprechen. Die Unterteilung der Monoton/Stationären Phase bei 35.000 Jahren beruht auf den Berechnungen von ENGELMANN (1993) und kennzeichnet den Zeitpunkt, bei dem die Temperatur im Einlagerungsbereich wieder den Zustand der ursprünglichen Gebirgstemperatur erreicht hat. Spätestens zu diesem Zeitpunkt ist selbst eine geringe Beeinflussung der Einwirkungen und Prozesse im Endlager auszuschließen. In der gesamten Monoton/Stationären Phase liegen keine derzeitig belegten transienten Beeinflussungen auf die FEP-Einwirkungen vor und die hydrogeologischen Gegebenheiten des Deckgebirges bleiben weitgehend erhalten. Die Monoton/Stationäre Phase hält bis zum Einsetzen der *Zyklischen Phase* an. Die Zyklische Phase beschreibt spät einsetzende Ereignisse aus globalen klimatischen Veränderungen und steht damit mit Vereisungen im Gebiet des Endlagers in Verbindung. Die in dieser Zeit auftretenden Veränderungen der FEP-Einwirkungen auf das Verschlussbauwerk entstehen hauptsächlich aus den Temperaturänderungen infolge tiefgreifender Abkühlung und den zusätzlichen Belastungen resultierend aus den Eislasten und somit der Gletschermächtigkeit. Da die Zyklische Phase durch globale klimatische Veränderungen bestimmt wird, hat die Änderung der Einwirkungen einen episodischen Charakter (z.B. Einsetzen der Kaltzeiten nach ca. 70.000 und ca. 150.000 Jahren mit zwischenliegender Warmzeit). Der Wechsel zwischen Kaltzeiten und Warmzeiten bewirkt jeweilige Temperatur- und besonders Belastungsveränderungen (Kapitel 7.4).

In Tab. 4 sind die für die Vorbemessung ausgewählten FEP-Einwirkungen den vier Zeitphasen (Betriebsphase, Transiente Phase, Monoton/Stationäre Phase, Zyklische Phase) zugeordnet. Sie veranschaulicht, welche FEP-Einwirkungen bei der Auslegung eines Verschlussbauwerks abhängig von der jeweilig festgelegten Lebensdauer berücksichtigt werden sollten. Eine farbliche Kennzeichnung markiert, in welchen Zeitabschnitten ein FEP auftritt (hellorange) und wann eine

¹³ Der Zeitraum von 200.000 Jahren wurde gewählt, um einen vollständigen Vereisungszyklus einbeziehen zu können.

mögliche Intensivierungen des FEP einsetzen könnten (dunkelorange). Intensivierungen sind Änderungen einer bereits bestehenden Einwirkung durch den Einfluss einer weiteren FEP-Einwirkung. Die Zeiträume in denen solche Änderungen auftreten sind wegen der teilweise komplexen Wechselbeziehungen zwischen den einzelnen FEP schwer zu ermitteln (entsprechende Daten oder Forschungsergebnisse liegen nicht vor) und wurden daher geschätzt. Es werden zudem nur die Intensivierungen dargestellt, die bedeutende Auswirkungen auf ein Verschlussbauwerk mit sich ziehen könnten, so wird beispielsweise die Änderung der FEP-Einwirkung Erosion infolge eines möglichen Meeresspiegelanstiegs/-abfalls vernachlässigt.

Tab. 4: Überblick über das zeitliche Auftreten der ausgewählten FEP-Einwirkungen an einem Streckenverschlussbauwerk; Abkürzungen: ind.=induziert, Inv.=Inventar, Org.=Organika, therm.=thermisch, SpU=Spannungsumlagerung, v.M.=von Materialien, Vol.-Ä.=Volumenänderung, Wirtsgest.=Wirtsgestein, randl.=randlich.

FEP-Name \ Jahre	Nachverschlussphase									
	Betriebsphase		Transiente Phase				Monotone/Stationäre Phase		Zyklische Phase	
	25	40	500	750	15.000	35.000	70.000	150.000		
Erdbeben										
Erosion										
Diapirismus										
Permafrost										
Inlandvereisung in randl. Lage										
Vollständige Inlandvereisung										
(Inv. Metalle) & Metallkorrosion										
Konvergenz										
Fluiddruck										
Nicht therm.ind. Vol.-Ä.v.M.										
Quellen des Bentonits										
Lösungszutritt ins Grubengebäude										
Geochemisches Milieu										
Auflösung/ Ausfällung										
Wärmeproduktion										
Therm. Expansion oder Kontraktion										
Therm. bedingte SpU im Wirtsgest.										

Alle farblich markierten FEP-Einwirkungen, die innerhalb der festgelegten Lebensdauer auftreten und für die jeweilige Art des untertägigen Verschlussbauwerks relevant sind (Kapitel 7.1), sollten in der Auslegung des Bauwerks berücksichtigt werden. Aber nicht jede FEP-Einwirkung, die in

bestimmten Zeitphasen auftritt, muss tatsächlich bei einer Vorbemessung eines geotechnischen Verschlussbauwerks einbezogen werden. Bei einer Lebensdauer von 1.000 Jahren wirken einzelne FEP mit so geringer Stärke auf ein Verschlussbauwerk ein, dass diese vernachlässigt werden können. Zum Beispiel ist die FEP-Einwirkung „Erosion“ ein ständig anhaltender Prozess und tritt damit in allen Zeitphasen auf. Die Folge der Erosion ist z.B. die Verminderung des Überlagerungsdruckes. Im Allgemeinen ist die Erosionsrate relativ gering und wird wahrscheinlich keine Auswirkung auf ein geotechnisches Verschlussbauwerk besitzen. Eine Intensivierung der Einwirkungen tritt erst durch die erhöhten Erosionsraten während einer Gletscherüberfahrung und des Abschmelzens aufliegender Gletscher (Kapitel 7.4) ein.

Die Zuordnung des Auftretens der einzelnen FEP-Einwirkungen zu den Zeitabschnittphasen zeigt, dass 10 der 17 FEP-Einwirkungen in der Nachverschlussphase durchgängig auftreten (FEP „Erosion“, „Diapirismus“, „Konvergenz“, „Fluiddruck“, „geochemisches Milieu“) bzw. zu jeder Zeit eintreten könnten (FEP „Erdbeben“, „Lösungszutritt ins Grubengebäude“, „Nichtthermische Volumenänderung von Materialien“, „Auflösung/Ausfällung“, „Änderung des geochemischen Milieus“, „Quellen von Bentonit“). Bei einigen dieser FEP-Einwirkungen können Intensivierungen auftreten, die an Temperaturveränderungen resultierend aus der Wärmeentwicklung der radioaktiven Abfälle oder durch globale Klimaänderungen gekoppelt sind.

Ausgehend von der Übersicht der auftretenden Einwirkungen einschließlich ihrer Intensivierungen in Tab. 4 können die relevanten Einwirkungen auf ein Streckenverschlussbauwerk für die jeweils angesetzte Lebensdauer eingehender betrachtet werden. Abb. 22 zeigt die in Kapitel 7.2 identifizierten sieben übergeordneten Einwirkungen für ein Streckenverschlussbauwerk mit einer Lebensdauer von 1.000 Jahren mit den jeweiligen Zeitspannen des Auftretens und dessen Ungewissheiten, ihrer Ausprägung und der Sicherheitsrelevanz in Abhängigkeit von der Zeit.

Die FEP-Einwirkung „Wärmeeinfluss radioaktiver Abfälle“ tritt während des gesamten Zeitraums von 1.000 Jahren auf. In diesem Zeitraum wird das Temperaturmaximum erreicht. Temperaturveränderungen im direkten Bereich des Streckenverschlusses setzen aufgrund der Entfernung zur Wärmequelle etwas verzögert ein. Folge ist, dass auch das Temperaturmaximum zu einem späteren Zeitpunkt erreicht wird, bevor der Einfluss der Temperaturveränderung langsam nachlässt. Der Temperaturanstieg bewirkt neben einer Änderung des geochemischen Milieus auch eine Erhöhung der Konvergenz und beeinflusst die in diesem Zusammenhang stehenden FEP-Einwirkungen. Die stärkste Ausprägung der Konvergenz wird zu Beginn der Nachverschlussphase auftreten und bis zum Rückgang der Temperatur andauern. In welchen Bereichen des Endlagersystems zu welchen Zeiten welche Konvergenzraten wirken ist ungewiss und muss durch eine Modellierung ermittelt werden.

Eine Beschreibung des zeitlichen Verlaufs der Ausprägungen der FEP-Einwirkung „Änderung des geochemischen Milieus“ ist derzeit nur eingeschränkt möglich. Das geochemische Milieu wird sich nach dem Verschluss des jeweiligen Streckenbereichs infolge einsetzender Prozesse z.B. Verbrauch des Sauerstoffs, Korrosion von zurückgebliebenen Metallen im Streckenbereich, Flüssigkeitszusammensetzungen aus der Wasserkondensation der Luftfeuchte und vorhandener Lösungsansammlungen kleineren Ausmaßes sowie Auflösungs- und Ausfällungsprodukten ändern. Verstärkungen oder Abschwächungen dieser Prozesse können durch Temperaturveränderungen oder durch einen potentiellen Lösungszutritt ins Grubengebäude hervorgerufen werden (Kapitel 8.2). Um eine Aussage über die Ausprägung geben zu können, sind geochemische Untersuchungen notwendig. Da die Temperaturmodellierung von BOLLINGERFEHR ET AL. (2012) ein Temperaturmaximum an einem Streckenverschlussbauwerk nach ca. 500 Jahren zeigt und auf der Grundlage, dass geochemischen Prozesse unter Beeinflussung einer Temperaturerhöhung negative Auswirkungen auf ein Bauwerk erwarten lassen (z.B. erhöhte Lösungsfähigkeit; siehe Kapitel 8.3.2), wird in diesem Bericht nur eine Abschätzung für ein definitives Auftreten der

Änderung des geochemischen Milieus im ungefähren Zeitraum von innerhalb 600 Jahren nach Verschluss der jeweiligen Streckenbereiche gegeben.

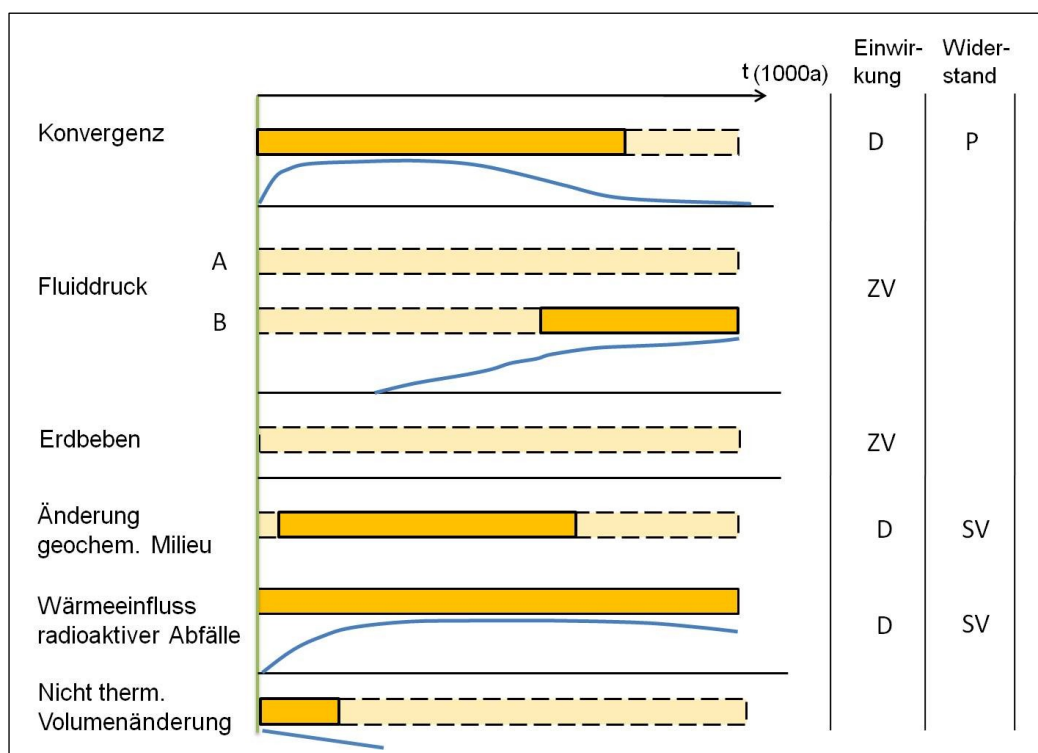


Abb. 22: Darstellung des ungefähren zeitlichen Verlaufes der übergeordneten FEP-Einwirkungen auf einen Streckenverschluss mit einer Lebensdauer von 1.000 Jahren bezüglich Auftreten, Ungewissheit, Ausprägung und Sicherheitsrelevanz

Auftreten = dunkelgelb und durchgehende Umrandung, Ungewissheit = hellgelb + gestrichelte Umrandung, Ausprägung = blaue Linie, Abkürzungen: ZV = zeitvariable Einwirkung, D = definitiv auftretende Einwirkung, SV = Sicherheitsverzehr, P = Positive Einwirkung, Fluiddruck A und B s. nachfolgender Text.

Aufgrund dessen, dass die FEP-Einwirkung „Wärmeeinfluss radioaktiver Abfälle“ als unbeeinflusste Einwirkung innerhalb der ersten 1.000 Jahre auftritt, und wegen der Tatsache, dass sie die FEP-Einwirkungen „Konvergenz“ und „Änderung des geochemischen Milieus“ beeinflussen wird, ergibt sich der Schluss, dass diese drei Einwirkungen definitiv auf ein Streckenverschlussbauwerk in dieser Zeit einwirken werden. Im Gegensatz dazu stehen die FEP-Einwirkungen „Erdbeben“ und „Fluiddruck A“, wobei der Fluiddruck A die Annahme über eine an einer Seite des Verschlussbauwerks vollständig anstehende Flüssigkeitssäule ist und damit das FEP „Lösungszutritt ins Grubengebäude“ beschreibt. Das Auftreten beider FEP-Einwirkungen ist mit einer großen Ungewissheit verbunden, da nicht vorhersehbar ist, ob und zu welchem Zeitpunkt diese Ereignisse eintreten. Die Hauptfunktion des Streckenverschlusses ist die Ver- und Behinderung eines Lösungszutritts (Kapitel 6). Daher ist das FEP „Lösungszutritt ins Grubengebäude“ unabhängig von Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen zu seinem Eintreten im Auslegungsszenarium zu berücksichtigen. Dies bedeutet auch eine Berücksichtigung seiner Wirkung auf Konvergenz und geochemisches Milieu. Das FEP „Erdbeben“ ist ebenfalls unabhängig von seiner Eintrittswahrscheinlichkeit im Auslegungsszenarium einzubeziehen. Dazu wird ein Bemessungserdbeben konzipiert, dessen Stärke sich aus der konservativen Auswertung von historischen Beben aus der geoseismischen Nah- und Fernfeldregion bestimmt (NMU 2002 / BRENNECKE ET AL. 2007 / BEUTH ET AL. 2012).

Die Bezeichnung Fluiddruck B in Abb. 22 umfasst den Druck, der durch Lösungen und Gase innerhalb von Poren oder anderen Hohlräumen entstehen kann. Es ist davon auszugehen, dass sich der Fluiddruck B durch die Volumenverringering der Poren und Hohlräume infolge der

Konvergenz erhöht. Damit steigt die Ausprägung der FEP-Einwirkung mit zunehmendem Verschluss der Hohlräume und Poren durch die Konvergenz im Laufe der Zeit an.

Die FEP-Einwirkung „Nicht thermische Volumenänderung von Materialien“ wird teilweise bereits während der Betriebsphase in die Auslegung eines Bauwerks einbezogen (z.B. Schwinden des Betons). In Bezug auf die Langzeitsicherheit sind dahingehende Vorgänge hinsichtlich einer möglichen Vergrößerung der Kontaktzone von Bedeutung. Die FEP-Einwirkung muss aber auch in der Nachbetriebsphase berücksichtigt werden, z.B. können wärmebeeinflusste Änderung der Löslichkeit der auftretenden Lösung oder der Zutritt von Lösungsvolumina eine Veränderung von Korrosionsprozessen hervorrufen. Das Auftreten und die Ausprägung dieser FEP-Einwirkung in der Nachbetriebsphase sind vornehmlich an das Auftreten und die Ausprägung eines Lösungszutritts oder des Wärmeeinflusses gekoppelt, deren Eintrittswahrscheinlichkeit mit der Zeit abnehmen.

Im rechten Bereich der Abb. 22 wird neben der Kennzeichnung der in diesem Zeitraum definitiv auftretenden bzw. zeitvariablen FEP-Einwirkungen die Sicherheitsrelevanz der Einwirkungen zugeordnet. In diesem Zusammenhang wird die Konvergenz als positive Einwirkung betrachtet. Der aus ihr resultierende Verschluss von Hohlräumen (potentiellen Wegsamkeiten) trägt zum Erhalt der Sicherheitsfunktion des Verschlussbauwerks bei. Das FEP „Nicht thermische Volumenänderung von Materialien“ ist eine transiente Einwirkung. Die FEP-Einwirkungen „Erdbeben“ und „Fluidruck A und B“ sind zeitvariabel. Da kein Zeitpunkt festgelegt werden kann, wann diese Einwirkungen auftreten, aber Abschätzungen über die Eintrittsrate vorgenommen werden können, wächst die Wahrscheinlichkeit, dass eine dieser Einwirkungen mit höherer Intensität eintritt, mit dem betrachteten Zeitraum. Die definitiv auftretenden FEP-Einwirkungen „Wärmeeinfluss radioaktiver Abfälle“ und „Änderung des geochemischen Milieus“ können unter Berücksichtigung der Variabilität der Einwirkung und des Zeitfaktors eine Abnahme des Widerstandes des Barrierebauwerks (Sicherheitsverzehr) bewirken.

7.4 Kombination und Interaktionen von FEP-Einwirkungen

Treten FEP-Einwirkungen in den gleichen Zeitphasen auf (Tab. 4), können diese sich gegenseitig beeinflussen. Durch diese Interaktionen könnten Einwirkungen intensiviert oder in deren Einwirkungsstärke herabgesetzt bzw. aufgehoben werden. Die Kenntnis über die dadurch hervorgerufene Einwirkungsstärke ist ausschlaggebend für die Bestimmung der Widerstandskraft des Barrierebauwerks und damit für eine effektive Vorbemessung.

Nachdem eine Einordnung der FEP-Einwirkungen nach ihrem zeitlichen Auftreten in vier Zeitphasen vorgenommen (Kapitel 7.3, Tab. 4) und die einseitigen und gegenseitigen Beeinflussungen bestimmt wurden (Kapitel 7.2, Abb. 16), können mögliche Kombinationen und Interaktionen der FEP-Einwirkungen innerhalb der einzelnen Zeitphasen betrachtet werden.

Bei einseitig beeinflussenden bzw. auslösenden FEP kann die Interaktion und deren Auswirkung auf die Einwirkungsintensität gut nachvollzogen werden. Dies wird im Folgenden exemplarisch am Beispiel der FEP-Einwirkungen „Erosion“ und „Vollständige Inlandvereisung“ erläutert. Die FEP-Einwirkung „Vollständige Inlandvereisung“ führt hauptsächlich zu drei Effekten: 1.) Spannungsänderungen durch die Auflast des Gletschers (sowie Entlastung bei/nach Schmelze) und der Abkühlung der oberen Deckgebirgsschichten sowie möglicherweise auch der oberen Bereiche des Salzstockes, 2.) erhöhte Erosionsraten durch Abschürfungen infolge der Auflast beim Gletschervorschub und durch Schmelzwasser beim Abschmelzen des Gletschers, 3.) mögliche Lageverschiebung des Verschlussbauwerks durch die hervorgerufene Salzbewegung infolge des einseitigen Auflastdrucks während des Gletschervorstoßes. Die FEP-Einwirkung „Erosion“ wird durch die FEP „Marine Bedingungen“ (Meeresspiegelveränderungen) und „Vollständige Inlandvereisung“

verstärkt. Erhöhte Erosionsraten führen zu einer Auflastverminderung, die Spannungs- und Druckänderungen in der Umgebung des Verschlussbauwerks hervorrufen. Folgen der Spannungsänderungen können Rissbildungen sein, die zur Beeinträchtigung der primären Sicherheitsfunktion des Verschlussbauwerks führen können. In Abb. 23 sind die zeitlichen Veränderungen der Intensität der Erosionsrate und der resultierende Verlauf der Spannungsänderung an einem Verschlussbauwerk schematisch dargestellt.

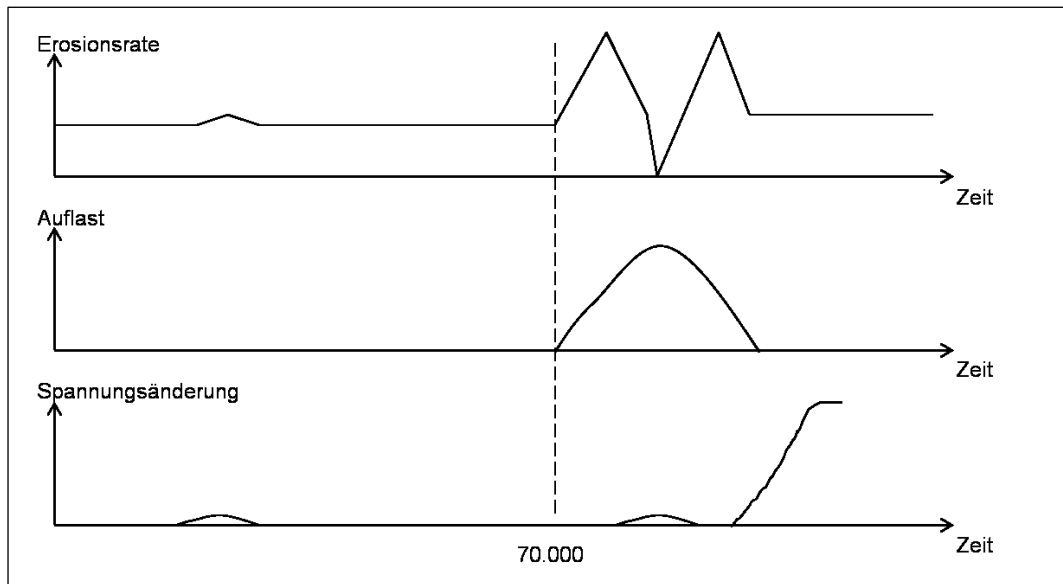


Abb. 23: Schematische Darstellung der Auswirkungen von den FEP „Marine Bedingungen“ (links) und „Vollständige Inlandvereisung“ (rechts) auf die Erosion, die Auflast und die Spannungsänderungen.

Der obere Graph in Abb. 23 zeigt die Veränderung der Erosionsrate mit der Zeit. Es wird ein Gletschervorstoß über den Salzstock in 70.000 Jahren angenommen. Bis zum Gletschervorstoß ist die Erosionsrate überwiegend einheitlich gering. Eine Erhöhung der Erosionsrate in dieser Zeit ist durch Meeresspiegelveränderungen (Wechsel zwischen Meeresspiegelanstieg und -abfall) möglich (im linken Teil der Graphik exemplarisch angedeutet). Dies könnte zu einer sehr geringen (zu vernachlässigbaren) Spannungsänderung im Bereich der Streckenverschlussbauwerke führen (untere Graphik Abb. 23). Mit dem Gletschervorstoß ab ca. 70.000 Jahre erhöht sich die Erosionsrate durch die Abtragung oberer Erd- bzw. Gesteinsschichten. Spannungsänderungen durch eine Auflastminderung als Folge der erhöhten Erosion treten in dieser Zeit vermutlich nicht auf, da diese durch die wegen der Gletschermächtigkeit erfolgende Auflasterhöhung kompensiert wird. Spannungsänderungen und eine mögliche Lageverschiebung aufgrund der Salzbewegung durch den einwirkenden Auflastdruck aus der Schubrichtung des Gletschers sollten besonders bei dem senkrecht gebauten Schachtverschluss aber auch beim Streckenverschluss berücksichtigt werden. Kommt der Gletscher zum Stillstand, sinkt die Erosionsrate kurzzeitig bis zum Nullpunkt. In dieser Zeit wird die Auflast des km-mächtigen Gletschers die Auflastreduzierung der vorangegangenen Erosion übersteigen. Die erhöhte Auflast wird, zusammen mit einer möglichen tiefreichenden Abkühlung der Boden- und Gesteinsschichten, Spannungsänderungen im Bereich des Streckenverschlusses hervorrufen. Mit dem Abschmelzen des Gletschers steigt die Erosionsrate infolge erhöhter Erosion durch den Schmelzwassereinfluss wieder an und die Auflast verringert sich. Die Folge ist eine extreme Auflastverminderung, die auf der Gewichtsabnahme des Gletschers, dem Erosionsbetrag im Zusammenhang mit dem Gletschervorstoß und dem Erosionsbetrag durch die Schmelzwässer beruht. Diese Auflastverminderung wird eine hohe Änderung des Spannungszustandes im Bereich des Verschlussbauwerks hervorrufen, die dessen Sicherheitsfunktion negativ beeinflussen kann.

Die für eine Vorbemessung eines Verschlussbauwerks zu berücksichtigenden ausgewählten FEP werden häufig durch mehrere FEP beeinflusst oder beeinflussen sich gegenseitig (Abb. 16). Eine wie oben durchgeführte Kombinationsbetrachtung wird in diesen Fällen komplexer. Abb. 24 zeigt die Abhängigkeiten der FEP-Einwirkungen für ein Streckenverschlussbauwerk mit einer Lebensdauer von 1.000 Jahren.

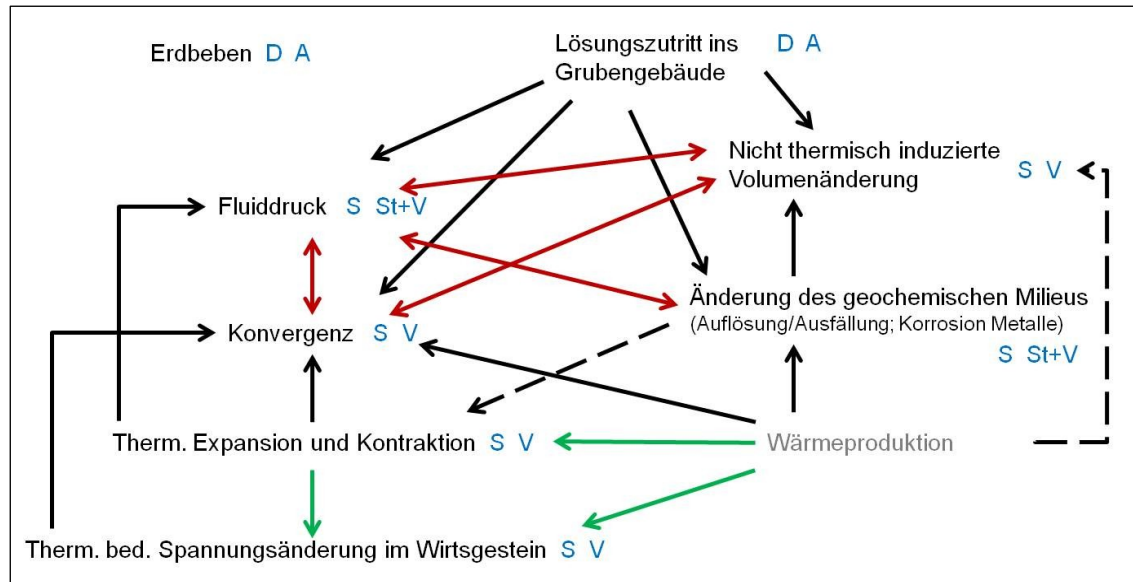


Abb. 24: Interaktionen der FEP-Einwirkungen auf ein Streckenverschlussbauwerk mit einer Lebensdauer von 1.000 Jahren,
 rot = gegenseitige Beeinflussung, schwarz = einseitige Beeinflussung, grün = auslösend;
 Abkürzungen: S = statisch, D = dynamisch, St = ständig einwirkend, V = veränderlich einwirkend, A = außergewöhnlich.

Eine Aussage über den Intensitätsgrad einer Einwirkung ist besonders bei sich gegenseitig beeinflussenden FEP-Einwirkungen schwierig. Die FEP-Einwirkung „Änderung des geochemischen Milieus“, selbst temperaturabhängig sowie wechselseitig abhängig von den Prozessen Auflösung/Ausfällung und der Korrosion von Metallen, steht in gegenseitiger Beeinflussung mit dem FEP „Fluiddruck“. Dieser wird durch einen Lösungszutritt ins Grubengebäude als auch durch die thermische Expansion/Kontraktion der Materialien einseitig beeinflusst, steht mit der Konvergenz aber in gegenseitiger Beeinflussung, welche wiederum auch durch die thermische Expansion/Kontraktion und einen Lösungszutritt ins Grubengebäude einseitig beeinflusst wird. Eine thermische Expansion/Kontraktion des Materials oder Gesteins wird durch Temperaturveränderungen ausgelöst und durch eine Änderung des geochemischen Milieus aufgrund Korrosions- und Alterationsprozessen beeinflusst. Das geochemische Milieu verändert sich sowohl durch die modifizierte Lösungszusammensetzung infolge eines Lösungszutritts ins Grubengebäude als auch durch hervorgerufene Veränderung ablaufender chemischer Prozesse infolge der Wärmeproduktion (Kapitel 8.2).

Bei vielen FEP besteht hinsichtlich möglicher Intensitäten und dem zeitlichen Auftreten noch Klärungsbedarf. Tritt ein solches FEP in Interaktion mit anderen FEP, kann auch bei letzteren die Intensität der Ein- bzw. Auswirkungen als auch die generellen Eintrittswahrscheinlichkeiten mit nur eingeschränkter Repräsentativität abgeleitet werden.

Eine Möglichkeit die FEP-Einwirkungsintensität und ihre Beeinflussung auf ein geotechnisches Bauwerk in die Auslegung einzubringen ist, die FEP-Einwirkungen nach ihrem zeitlichen Eintreten zu sortieren und in die jeweilig folgenden FEP-Einwirkungen die Auswirkungen der vorangegangenen FEP-Einwirkungen einzubeziehen (siehe Kapitel 8.4).

8 Einbindung langfristig relevanter FEP in einen ingenieurtechnischen Ansatz

Ingenieurtechnische Empfehlungen und Richtlinien beziehen sich überwiegend auf eine Auslegung von übertägigen oder oberflächennahen Bauwerken für einen Zeitraum von ca. 100 Jahren mit der Möglichkeit der Ausbesserung. Für untertägige geotechnische Verschlussbauwerke in einem Endlager für radioaktive Stoffe besteht zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit die Forderung nach einer nachsorgefreien Funktionalität über weitaus längere Zeiträume (Kapitel 3 und 6). Um eine durchgängige Funktionstüchtigkeit eines Verschlussbauwerks innerhalb der ihm zugewiesenen Lebensdauer zu gewährleisten, folgt auf Basis der für eine Vorbemessung als relevant angesehenen FEP (Kapitel 7) im Schritt 2 des in dieser Arbeit vorgestellten Rahmenkonzeptes deren Einbindung in den ingenieurtechnischen Ansatz für eine Auslegung von Abdichtungsbauwerken. In dieser Arbeit wird unter dem „ingenieurtechnischen Ansatz“ ein Ansatz verstanden, der auf den für sinnvoll übertragbar erachteten Forderungen aus den Empfehlungen des Deponiewesens (GDA, weitere Empfehlungen der Untertagedeponierung), der DIN EN 1990ff und der DAfStb (Kapitel 4) basiert. Allen liegen Anforderungen an die Tragfähigkeit, Beständigkeit, Dichtigkeit und Herstellbarkeit zugrunde. Da in den GDA-Empfehlungen die zu prüfenden einzelnen Eigenschaften zusammenfassend dargestellt sind, werden diese als Grundlage für den Abgleich mit den langzeitlichen Anforderungskriterien genutzt.

Ziel dieses Kapitels ist zum einen eine Zuordnung und eine Abgleichung der Prüfanforderungen aus den GDA-Empfehlungen und der durch die für eine Vorbemessung festgelegten FEP bedingten Anforderungen. Es wird dargelegt, welche Anforderungen an ein geotechnisches Verschlussbauwerk in einem Endlager für radioaktive Stoffe gestellt werden und welche der im Kapitel 7.1 identifizierten Einwirkungen bei der Auslegung bereits berücksichtigt werden oder für eine Auslegung über längere Zeiträume zusätzlich hinzugezogen werden sollten. Zu anderem sollen Kriterien an ein Abdichtungsbauwerk und deren Beeinflussung durch langfristig auftretende Einwirkungen aufgezeigt werden.

Im Kapitel 6 wird gezeigt, dass ein Streckenverschluss während seiner gesamten Lebensdauer verschiedene Sicherheitsfunktionen erfüllen muss. Die geotechnische Barriere dient neben der Abdichtung gegen zutretende salzstockexterne Lösungen auch zur Verhinderung der Freisetzung von Radionukliden in gesundheitsgefährdender Menge. Unter Berücksichtigung des Sicherheitskonzeptes „Sicherer Einschluss“ steht die primäre Sicherheitsfunktion SF ‚Ver- und Behinderung eines Lösungszuflusses‘ im Vordergrund dieser Arbeit. Das erfordert insbesondere die Betrachtung von Prozessen, die zur Alteration, Rissbildung, Kanalisation und Umläufigkeiten führen können, um die Tragfähigkeit und Dichtigkeit des Verschlussbauwerks und damit die Sicherheit für Leib und Leben gewährleisten zu können (vgl. Kapitel 6). Zur Gewährleistung des Sicherheitsanspruches an ein Verschlussbauwerk in einem Endlager für radioaktive Abfälle spielt nicht nur die Betrachtung der bautechnischen Konstruktion sowie der Kontaktzone zwischen bautechnischer Konstruktion und Wirtsgestein, sondern auch die durch die bergmännische Auffahrung bedingten Auflockerungsbereiche des Salzgebirges im Nahfeld der Barriere eine entscheidende Rolle (Abb. 25). XIE (2003) veranschaulicht, dass in den aufgelockerten Bereichen (Auflockerungszone, Übergangszone) eine Änderung der geomechanischen und geohydraulischen Eigenschaften (Festigkeit, Porosität, Permeabilität usw.) des Salzgebirges vorliegt. Er beschreibt, dass infolge einer Vernetzung von vorliegenden und im Laufe der Zeit neu entstehenden Poren und Mikrorissen eine Umläufigkeit des Abdichtungsbauwerks über diese Bereiche möglich ist. Die Eigenschaften des dem Streckenverschlussbauwerk umgebenden Gebirgsbereiches sind daher von entscheidender Bedeutung bei einem Nachweis der Funktionstüchtigkeit eines Verschlussbauwerks und müssen bei der Auslegung einer geotechnischen Barriere in die Betrachtungen einbezogen werden.

Bei der Vorbemessung steht in dieser Arbeit zunächst das Streckenverschlussbauwerk hinsichtlich seiner Material- und Konzeptionsprüfung (Design) im Vordergrund. Dennoch sind erste vereinfachte Untersuchungen bezüglich der Dichtigkeit der Auflockerungszone als auch der Dichtigkeit und Scherfestigkeit der Kontaktzone einzubeziehen. Eine vollständige Betrachtung von Bauwerk und Auflockerungsbereichen im Gebirge (Streckenverschluss-System) erfolgt in der Bemessung.

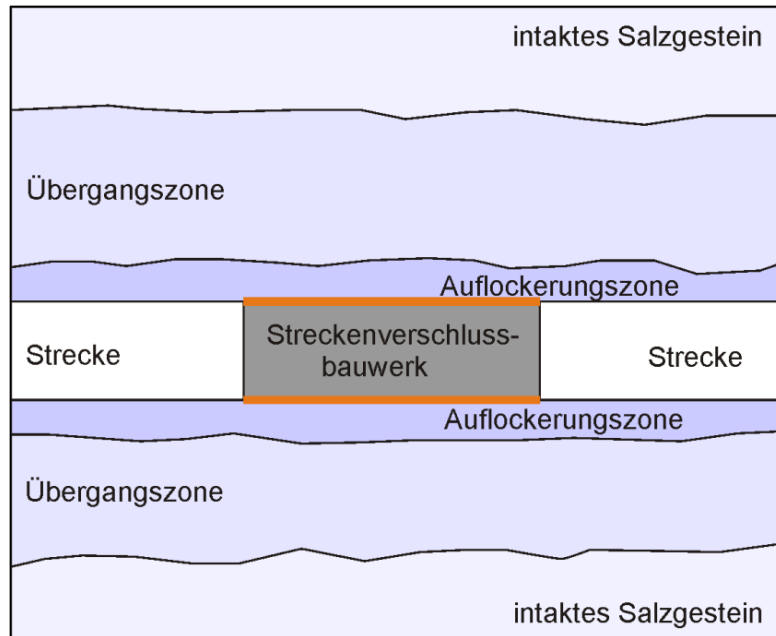


Abb. 25: Schematische Darstellung eines Systems aus Streckenverschlussbauwerk und umgebendem Salzgebirge mit den aufgelockerten Bereichen (Auflockerungszone, Übergangszone) (in Anlehnung an XIE 2003), orange=Kontaktzone.

8.1 Abgleich der Kriterien zur Langzeitsicherheit mit den zu prüfenden Eigenschaften der GDA-Empfehlung

Nach der getrennten Betrachtung der langfristig möglichen Einwirkungen und den derzeit gültigen ingenieurtechnischen Auslegungsanforderungen wird basierend auf dem im Kapitel 5 vorgestellten Rahmenkonzept eine Zusammenführung beider Betrachtungen für eine langzeitsichere Auslegung der geotechnischen Barriere angestrebt. Dafür werden die aus den beeinflussenden FEP-Einwirkungen abgeleiteten Anforderungen aus den Langzeitsicherheitsbetrachtungen in die Anforderungen aus den GDA-Empfehlungen (GDA 1997) integriert. Die Anforderungen aus den GDA-Empfehlungen beinhalten, wie in Kapitel 4.2.2 dargestellt, die Prüfung der Beständigkeit, Dichtigkeit, Tragfähigkeit und Herstellbarkeit. Ihnen sind zu prüfende Eigenschaften zugewiesen, die den Nachweis unter Annahme von verschiedenen Lastfällen erfordern. Auf die Betrachtung der Anforderungen an die Herstellbarkeit wird im Folgenden verzichtet. Die Zusammenführung wird nachstehend am Beispiel der 14 identifizierten FEP für ein Streckenverschlussbauwerk mit einer Lebensdauer von 1.000 Jahren (siehe Kapitel 7.1) im Hinblick auf eine Vorbemessung durchgeführt. Einige FEP müssen in mehreren der Auslegungsanforderungen berücksichtigt werden, da sie verschiedene Lastfälle unterschiedlich beeinflussen; diese werden im gegebenen Kontext angesprochen.

Die Abb. 26 bis 28 zeigen die in der GDA empfohlenen Anforderungen mit ihren zu prüfenden Eigenschaften und Lastfällen. Im jeweiligen rechten Bereich der Abbildungen sind die FEP-Einwirkungen und deren Auswirkungen (siehe Kapitel 7) dargestellt, die die jeweiligen zu prüfen-

den Eigenschaften beeinflussen und daher berücksichtigt werden müssen. Durch die Integration der Einwirkungen aus der Langzeitsicherheit sollten die den prüfenden Eigenschaften zugehörigen Lastfallüberprüfungen teilweise erweitert werden. Die Erweiterungen zu den GDA-Anforderungen sind farbig (grün) markiert.

Abb. 26 zeigt die Anforderungen an die Tragfähigkeit eines Bauwerks. Bei der Tragfähigkeitsprüfung wird nur das Verhalten des Abdichtungssystems bei mechanischer Belastung geprüft. Zu untersuchende Lastfälle umfassen die Kräfte aus Verformungen, aus Neigung und Auflast sowie Sonderlasten. Zu den beeinflussenden FEP-Einwirkungen gehören diejenigen, die eine mechanische Auswirkung auf das Bauwerk mit sich ziehen können. Eine Rissbildung als mechanische Auswirkung entsteht durch eine Spannungsänderung bzw. -umlagerung im Material oder in dessen angrenzenden Bereichen. Spannungsumlagerungen entstehen direkt durch die FEP-Einwirkungen „Erdbeben“, „Lösungszutritt ins Grubengebäude“ und dem Einsetzen der „Konvergenz“, sowie indirekt infolge von Volumenänderungen bei der „Thermischen Exhalation/Kontraktion“ und „Nicht thermisch induzierten Volumenänderung von Materialien“.

Da die FEP-Einwirkungen „Konvergenz“, „Thermische Exhalation/Kontraktion“ und „Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien“ Verformungen des Materials hervorrufen, können sie in den Lastfallnachweisen von ‚Kräften aus Verformungen‘ abgedeckt werden. Erdbeben werden, wie im Kapitel 7.1 beschrieben, gesondert behandelt. Sie können aber im Nachweis bzgl. von ‚Kräften aus Sonderlasten‘ oder in einem neuen nachzuweisenden Lastfall von ‚Kräften aus Spannungsumlagerungen‘ einbezogen werden. Im letzteren Lastfall werden auch die FEP-Einwirkung „Thermisch bedingte Spannungsumlagerungen im Wirtsgestein“ und der „Fluiddruck“ untersucht. Die Einwirkung der „Thermisch bedingten Spannungsänderung im Wirtsgestein“ beeinflusst nicht direkt die Bauwerksmaterialien. Selbst wenn die Wärmequelle sich nicht im Nahfeld des Verschlussbauwerks befindet, können besonders im Kontaktbereich der geotechnischen Konstruktion und des umgebenden Wirtsgesteins Zugspannungen hervorrufen werden, die das dort vorliegende Spannungsfeld beeinflussen. Die FEP-Einwirkung „Fluiddruck“ fällt laut den GDA-Empfehlungen in die zu prüfenden Lastfälle der hydraulischen Beständigkeit. Der Druck einer einseitig anstehenden Flüssigkeitssäule im Zusammenhang mit dem FEP „Lösungszutritt ins Grubengebäude“ kann aber u.U. zu einer Lageverschiebung führen, die eine Rissbildung mit sich führen kann. Demnach sollte die Untersuchung des Fluiddrucks und die Auswirkungen bei einem Lösungszutritt ins Grubengebäude auch beim Tragfähigkeitsnachweis einbezogen werden. Die Betrachtung eines Lösungszutrittes kann in den Lastfallnachweisen von Kräften aus Sonderlasten oder von Kräften aus Spannungsumlagerungen aufgenommen werden.

Ein Langzeitnachweis der Tragfähigkeitsanforderungen erfordert eine zeitliche Erweiterung der zu betrachtenden Lastfälle von Kräften aus Verformungen und Spannungsänderungen auf > 100 Jahre, als auch die Berücksichtigung der möglicherweise beeinflussten Widerstandsfähigkeit durch vorangegangene oder parallel ablaufende Einwirkungen. Dabei müssen die Veränderung der Spannungsumlagerungen und der Verformungen durch den Anstieg und den Abfall der Temperatur durch die wärmeentwickelnden Abfälle einbezogen werden. Beim Nachweis hinsichtlich der verschiedenen Lastfälle ist dabei ausschlaggebend, dass ein durch eine Temperaturerhöhung intensivierte Alterung bzw. Korrosion einiger Materialkomponenten verändertes Materialverhalten des Barrierebauwerks berücksichtigt wird.

GDA			FEP	
Anforderung	zu prüfende Eigenschaft	Lastfälle	Einwirkung	Auswirkung
Tragfähigkeit	Verhalten des Abdichtungssystems bei mechanischer Belastung	Mechanische Lastfälle: <ul style="list-style-type: none"> - Kräfte aus Verformungen - Kräfte aus Neigung und Auflast - Kräfte aus Sonderlasten - infolge Spannungsumlagerungen 	Konvergenz	SpU
			(Fluiddruck)	SpU, Riss
			(Lösungszutritt ins Grubengebäude)	SpU, Riss, LV
			Thermische Ex/Ko	SpU, VÄ, Riss
			Thermisch bedingte SpU im Wirtsgestein	SpU, Riss
			Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	SpU, VÄ, Riss
			Erdbeben	SpU, Riss
			Wärmeproduktion	Interaktion = Verstärkung
			Änderung geochemisches Milieu	Alteration

Abb. 26: Zuordnung der FEP-Einwirkungen zu den Anforderungen an die zu prüfenden Eigenschaften der Tragfähigkeit für ein Streckenverschlussbauwerk mit einer Lebensdauer von 1.000 Jahren, grün=Erweiterungen der GDA-Empfehlungen hinsichtlich der zu untersuchenden Lastfälle und der zu berücksichtigenden Einwirkungen, Abkürzungen: SpU=Spannungsumlagerung, VÄ=Volumenänderung von Materialien, Ex/Ko=Exhalation und Kontraktion, LV=Lageverschiebung.

Abb. 27 gibt eine Übersicht über die zu prüfenden Eigenschaften und Lastfälle der Beständigkeitsanforderungen. Die Anforderungen an einen Beständigkeitsnachweis umfassen Untersuchungen hinsichtlich der Langzeitbeständigkeit, der Temperaturbeständigkeit und der hydraulischen Beständigkeit der Bauwerksmaterialien. Die Langzeitbeständigkeit betrifft die Widerstandsfähigkeit des Verschlussbauwerks gegenüber chemischen Lastfällen. Im Nachweis werden Alterations- und Korrosionsprozesse betrachtet. Bei einer Auslegung eines Verschlussbauwerks in einem Endlager für radioaktive Stoffe spielt die Art und die Veränderung der Zusammensetzung von anstehenden Flüssigkeiten eine wesentliche Rolle. Daher sind auch Untersuchungen im Zusammenhang mit einer vollständig einseitig anstehenden Lösung (FEP „Lösungszutritt ins Grubengebäude“) notwendig. Ausschlaggebend für den Nachweis der Langzeitbeständigkeit ist die Kenntnis über die Entwicklung und die mögliche Veränderung des FEP „Geochemisches Milieu im Grubenbau“. Die FEP-Einwirkungen „Auflösung/Ausfällung“ und „Metallkorrosion“ stehen mit der Änderung des geochemischen Milieus in Wechselwirkung. Sie werden von Temperaturveränderungen und durch einen möglichen Lösungszutritt ins Grubengebäude in ihrer Ausprägung beeinflusst (Kapitel 7.2). Die FEP-Einwirkung „Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien“ wird in diesem Zusammenhang nicht aufgrund des Prozesses der Volumenänderung an sich, sondern aufgrund der daraus entstehenden Gase oder gelösten Stoffe (z.B. bei der Metallkorrosion), die zur Veränderung des geochemischen Milieus beitragen und damit die Zusammensetzung vorhandener Lösungen beeinflussen, einbezogen. Die Erweiterung des Nachweises der Langzeitbeständigkeit auf den Betrachtungszeitraum (Lebensdauer) untersucht daher nicht nur die Zusammensetzung von anstehenden Lösungen, sondern auch deren Art (Lösungszutritt, normale Fluidvorkommen im Grubenbau). Dabei müssen die Dauer der Einwirkungen während bestimmter Zeitphasen und die

zeitlich veränderten Bedingungen unter Temperaturanstieg und -abfall (Wärmeentwicklung aus radioaktiven Abfällen) einbezogen werden.

GDA			FEP	
Anforderung	zu prüfende Eigenschaft	Lastfälle	Einwirkung	Auswirkung
Beständigkeit	Langzeit-beständigkeit	Chemische Lastfälle definiert durch: - Art und Zusammensetzung der Lösungen (Prüfflüssigkeiten) - Dauer der Einwirkung	Geochemisches Milieu im Grubenbau	Alteration
			Auflösung/Ausfällung	Alteration
			Metallkorrosion	Alteration
			Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	Gase, Alteration
			Lösungszutritt ins Grubengebäude	Interaktion =Änderung
			Wärmeproduktion	Interaktion =Verstärkung
	Temperaturbeständigkeit	Thermische Lastfälle definiert durch: - Hohe bzw. niedrige Temp. - Dauer der Temp.-einwirkung	Thermische EX/Ko	SpU, Schwund, Riss
			Wärmeproduktion	Auslösend, =Zeit, max. Temperatur
	Hydraulische Beständigkeit	Hydraulische Lastfälle: Kräfte resultierend aus Strömungsvorgängen	Fluiddruck (hydrostatisch und hydrodynamisch)	Kanalisation, Umläufigkeit
			Lösungszutritt ins Grubengebäude	Änderung Fluiddruck
			Ausfällungen	Schließung Porenraum
			Auflösungen	Kanalisation
			Wärmeproduktion	Interaktion =Verstärkung
			Änderung geochemisches Milieu	Alteration

Abb. 27: Zuordnung der FEP-Einwirkungen zu den Anforderung an die zu prüfenden Eigenschaften der Beständigkeit für ein Streckenverschlussbauwerk mit einer Lebensdauer von 1.000 Jahren, grün= Erweiterungen der GDA-Empfehlungen hinsichtlich der zu untersuchenden Lastfälle und der zu berücksichtigende Einwirkungen, Abkürzungen: Ex/Ko=Exhalation und Kontraktion, Temp.=Temperatur, SpU= Spannungsumlagerung.

Eine weitere zu prüfende Eigenschaft ist die Temperaturbeständigkeit der Bauwerksmaterialien. Während die thermischen Lastfälle sich in der Auslegung nach den GDA-Empfehlungen auf den Temperatureinfluss während des Abbindungsprozesses und auf die natürlichen Umgebungstemperaturen beschränken, muss der Langzeitnachweis der Temperaturbeständigkeit auch die Temperatureinflüsse aus den wärmeentwickelnden Abfällen berücksichtigen. Dabei spielt

neben der möglichen Maximaltemperatur auch die Dauer der Temperatureinwirkung eine Rolle. Eine Untersuchungskomponente ist die FEP-Einwirkung „Thermische Exhalation/Kontraktion“. Während sie bei dem Tragfähigkeitsnachweis hinsichtlich ihrer Spannungumlagerungen in die Betrachtungen einbezogen wird, stehen hier besonders die Prozesse der Volumenvergrößerung und -verkleinerung und deren Einfluss auf die Materialeigenschaften im Vordergrund.

Die dritte zu prüfende Eigenschaft für einen Beständigkeitsnachweis ist die hydraulische Beständigkeit. Dabei werden die aus Strömungsvorgängen resultierenden Kräfte untersucht. In diesen Nachweisen sollten für längere Zeiträume die Alterationserscheinungen berücksichtigt werden. Durch Korrosions- und Alterationsprozesse kann die Stabilität des Verschlusssystems verringert werden. Daher sinkt der Widerstand gegen Strömungsvorgänge, die Schädigungen bis hin zu Kanalisierungen oder Umläufigkeiten hervorrufen können. Der hydrostatische und hydrodynamische Fluiddruck kann, erhöht durch die Wärmeentwicklung aus den eingelagerten Abfällen, zu Mikro- bis Makrofissuren führen (siehe Beschreibung Tragfähigkeitsanforderung), wodurch die Strömungsvorgänge begünstigt werden können. Ausfällungen könnten zu einer Schließung von Poren- oder Hohlräumen führen und dadurch die Durchlässigkeit erniedrigen. Auflösungen könnten eine Kanalisierung hervorrufen und damit die Durchlässigkeit erhöhen.

Neben der Tragfähigkeit und der Beständigkeit bestehen Anforderungen an die Dichtigkeit. Zu prüfende Eigenschaften sind laut GDA (1997) das Konvektions-, Diffusions-, und Sorptionsverhalten als auch die Empfindlichkeit gegenüber Fehlstellen in Abdichtungselementen (Abb. 28). Da in dieser Arbeit die primäre Sicherheitsfunktion des Sicherheitskonzeptes „Sicherer Einschluss“ die SF ‚Ver- und Behinderung eines Lösungszutritts‘ im Mittelpunkt steht, werden keine Nachweise über das Sorptionsverhalten betrachtet (siehe Kapitel 6). Das Konvektions- und Diffusionsverhalten sollte bei den Betrachtungen zum Korrosionsverhalten und -fortschritt einbezogen werden. Der Nachweis der Dichtigkeit im Bereich von möglichen Fehlstellen ist besonders wichtig. Solche Fehlstellen sind mögliche Schwächezonen wie z.B. Bauwerksfugen, der Firstbereich, die Kontaktzone zwischen der geotechnischen Konstruktion und dem umgebenden Gebirge und die aufgelockerten Bereiche im Nahfeld des Verschlussbauwerks (Auflockerungszone, Übergangszone). Schwächezonen in der Baukonstruktion und dessen Kontaktzone sind Stellen, an denen kein einheitlicher Verbund zwischen den Feststoffen besteht. Sie bieten daher einen geringeren Widerstand gegenüber Einwirkungen als einheitliche Materialien. Die zugeordneten FEP-Einwirkungen können die Schwächezonen beeinflussen. An den Flächen der Fehlstellen bzw. Schwächezonen können Fluide besser eindringen. Auflösungsprozesse können in diesen Bereichen Kanalisierungen oder Umläufigkeiten hervorrufen. Auflösungen stehen in Wechselwirkung mit dem geochemischen Milieu und können sich mit dessen Änderungen bei Temperaturanstieg erhöhen. Ein Temperaturanstieg beschleunigt auch die Konvergenz, die zum Verschluss von Hohlräumen führen kann. Ausfällungen (z.B. infolge eines Temperaturabfalls bei einigen übersättigten Lösungen) könnten, ebenso wie die Konvergenz, das Dichtigkeitsverhalten der Barriere durch den Verschluss von Poren- und Klufthohlräumen bzw. der Schwächezonen positiv beeinflussen. Ein weiterer wichtiger Betrachtungspunkt im Zusammenhang mit einem Temperaturabfall ist das Kontraktionsverhalten der geotechnischen Konstruktion und des umgebenden Gebirges. Zu überprüfen ist diesbezüglich, inwieweit sich die unterschiedlichen Materialien nach ihrer durch eine Temperaturerhöhung hervorgerufenen Ausdehnung wieder zusammenziehen, und ob durch den dadurch möglicherweise hervorgerufenen Schwund mögliche Wegsamkeiten im Bereich der Kontaktzone entstehen können. Ein anderer Betrachtungspunkt ist eine mögliche Bildung von Wegsamkeiten oder Kanalisierungen durch die FEP-Einwirkung „Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien“. Diese umfasst beispielsweise eine durch Temperatur erhöhte Metallkorrosion von im Grubenraum befindlichen Ankern oder Schienen.

GDA		FEP	
Anforderung	zu prüfende Eigenschaft	Einwirkung	Auswirkung
Dichtigkeit	Konvektionsverhalten, Diffusionsverhalten, Sorptionsverhalten		
	Empfindlichkeit gegenüber Fehlstellen in Abdichtungselementen	Konvergenz	Verschluss
		Wärmeproduktion	Interaktion = Verstärkung
		Thermische Ex/Ko	Umläufigkeit
		Auflösung/Ausfällung	Umläufigkeit, Kanalisierung
		Geochemisches Milieu	Alteration
		Metallkorrosion	Kanalisierung
		Nicht thermisch induzierte VÄ von Materialien	Wegsamkeit

Abb. 28: Zuordnung der FEP-Einwirkungen zu den Anforderung an die zu prüfenden Eigenschaften der Dichtigkeit für ein Streckenverschlussbauwerk mit einer Lebensdauer von 1.000 Jahren, grün=Erweiterungen, Abkürzungen: VÄ=Volumenänderung.

Die Zuordnung der möglichen FEP-Einwirkungen auf einen Streckenverschluss mit einer Lebensdauer von 1.000 Jahren zu den zu prüfenden Eigenschaften aus der GDA (1997) zeigt, dass die GDA-Auslegungsaspekte für ein Verschlusssystem grundlegend auf eine Auslegung für längere Zeiträume übertragbar sind. Erweiternde Betrachtungen ergeben sich neben der teilweise abweichenden Interpretation und den zusätzlich zu prüfenden Eigenschaften besonders hinsichtlich der Zeitspannen von Temperaturveränderungen aus den eingelagerten wärmeentwickelnden Abfällen, den daraus resultierenden Änderungen des geochemischen Milieus (mögliche Folgen: Alteration, Korrosionserhöhung und damit Festigkeitsminderung) und die veränderten Spannungseinwirkungen. Die Höhe der Spannungseinwirkungen bestimmt sich aus der Interaktion der FEP-Einwirkungen und muss im Zusammenhang mit der durch die Alteration veränderten Festigkeit bei der Sicherheitsüberprüfung der Vorbemessung berücksichtigt werden.

8.2 Sicherheitsnachweis mit Hilfe von Kriterien und Indikatoren

„Das aus verschiedenen Komponenten bestehende geotechnische Verschlusssystem hat die Aufgabe, die bei der Errichtung des Endlagerbergwerks unvermeidbare punktuelle Verletzung der Integrität der geologischen Barriere zu kompensieren und somit zum dauerhaft sicheren Einschluss der Abfälle beizutragen“ (GRS & PTKA WTE 2011 S. 3). Um diese Aufgabe zu erfüllen werden grundsätzliche Anforderungen an ein geotechnisches Barrierebauwerk gestellt (siehe Kapitel 4.2.2). Die Prüfung der Anforderungen hinsichtlich einer langzeitigen Funktionsfähigkeit erfolgt nach der Betrachtung von entsprechenden zu prüfenden Eigenschaften (Kapitel 8.1) anhand eines Sicherheits-Nachweiskonzepts. Bei diesem „werden diejenigen Maßnahmen summiert, die zur Darlegung der Sicherheit beitragen und mit deren Hilfe die Tragwerksanalyse und die Nachweise der Standsicherheit [Tragfähigkeit] und Barriereintegrität erfolgen“ (DÜSTERLOH 2009 S. 15). Anhand von Prüfkriterien und den daran gebundenen Indikatoren wird untersucht, ob während der gesamten Lebensdauer einwirkende Beanspruchungen die ertragbaren Beanspru-

chungen übersteigen können (Tragfähigkeitsnachweis) und die Unversehrtheit der Barriere weder durch anthropogen noch durch chemisch oder geogen induzierte Prozesse in Bezug auf einen Lösungszutritt oder einen Austritt von Schadstoffen aus dem Endlager gegeben bleibt (Integritätsnachweis). Bezogen auf die in Kapitel 8.1 veranschaulichten zu prüfenden Eigenschaften prüft der Tragfähigkeitsnachweis das Verhalten des Streckenverschlusses bei mechanischer Belastung und umfasst die Untersuchung mechanischer Lastfälle, z.B. Verformung durch Auflast (siehe Kapitel 4.2). Der Nachweis der Barriereintegrität umfasst die eingehaltenen Anforderungen an die Beständigkeit und Dichtigkeit. Die Prüfung der Beständigkeit umfasst die Nachweise zur Langzeitbeständigkeit, Temperaturbeständigkeit und hydraulischen Beständigkeit. Sie betrachtet damit die chemischen, thermischen und hydraulischen Lastfälle. Bei dem Dichtigkeitsnachweis werden das Konvektions- und Diffusionsverhalten sowie die Empfindlichkeiten gegenüber Schwächezonen des Streckenverschluss-Systems geprüft. Innerhalb der Nachweisführung wird die Ausprägung der Einwirkungen untersucht und der material- und konstruktionsspezifische Widerstand beschrieben.

8.2.1 Kriterien zum Nachweis der Tragfähigkeit und Integrität

Um eine dauerhafte Funktionssicherung der geotechnischen Barriere aufzuzeigen, werden verschiedene Kriterien zum Nachweis der Tragfähigkeit (einwirkende Beanspruchungen < ertragbare Beanspruchungen) und der Barriereintegrität (Unversehrtheit) aufgestellt und geprüft. Innerhalb der Überprüfung der Tragfähigkeit und der Integrität wird sich auf die Untersuchungen von Spannungseinwirkungen und deren Auswirkungen auf das Streckenverschluss-System konzentriert. Eine chemische Stabilität bzw. Ergebnisse hinsichtlich einer Veränderung geochemischer Verhältnisse (z.B. Auflösungs- und Ausfällungsreaktionen) werden dabei vorausgesetzt.

In Abb. 29 sind die wichtigsten Nachweiskriterien für die Tragfähigkeit (schwarz) und die Barriereintegrität (rot) dargestellt.

Für den Nachweis der Tragfähigkeit werden auftretende Zug-, Druck-, Schubspannungen und Verzerrungen überprüft. Um die grundsätzliche Anforderung – ertragbare Belastungen > einwirkenden Belastungen – zu erfüllen, müssen mögliche auftretende Spannungen unterhalb der Festigkeiten des Barrierebauwerks liegen. Daher sollten mögliche Zugspannungen kleiner als die Zugfestigkeit sein, mögliche Druck- und Schubspannungen unterhalb der Bruchfestigkeit und mögliche Verzerrungen unterhalb der Bruchverzerrung liegen. Weiterhin dürfen auftretende Schubspannungen im Kontaktbereich zwischen Bauwerk und dem umgebenden Gebirge die Scherfestigkeit bzw. den Scherwiderstand nicht überschreiten. Dieser Prüfaspekt untersucht direkt die Kontaktzone, die im Barrierebauwerkssystem als Schwächezone hinsichtlich der Dichtigkeit gesehen werden kann. Sie muss daher im Hinblick auf einen Dichtigkeitsnachweis überprüft werden und ist somit auch für den Nachweis der Barriereintegrität notwendig.

Im Allgemeinen wird die Integrität durch zwei übergeordnete Kriterien überprüft: das Dilatanzkriterium (mechanisches Integritätskriterium) und das Fluidkriterium (hydraulisches Integritätskriterium). Die Dilatanzfestigkeit wird als Beanspruchungsgrenze für das Auftreten erster Gefügeschädigungen definiert (DÜSTERLOH 2009). Während bis zum Erreichen der Dilatanzgrenze nur eine geringe bzw. keine Änderung des ursprünglichen Porenraums stattfindet, erfolgt bei weiterer Beanspruchung (Schub- und Zugspannungen) durch eine Neubildung von Mikrorissen und einer Öffnung vorhandener Mikrorisse (Makrorissbildung) eine Gefügeentfestigung und -auflockerung mit einhergehender Volumenvergrößerung (XIE 2003). Die Gefügeschädigungen treten im Beanspruchungsbereich zwischen Dilatanzfestigkeit und Bruchfestigkeit auf, wobei die Größe der Schädigung einerseits vom Verhältnis zwischen Beanspruchungsniveau und Dilatanzfestigkeit und andererseits von der zeitlichen Einwirkungsdauer der Beanspruchung abhängig ist (DÜSTERLOH 2009). Gefügeschädigungen und die sich daraus ergebenden Volumendehnungen eines deviatorisch beanspruchten Materials setzen die Gefügefestigkeit herab, woraus eine Zunahme der

Verformungsfähigkeit bei gleichzeitiger Tragfähigkeitsreduzierung und bei Vernetzung und Verdichtung eine Erhöhung der Durchlässigkeit resultieren kann (HOU 2002 / XIE 2003). Dadurch kann z.B. bereits die Permeabilität innerhalb des Barriersystems erhöht werden, obwohl die Bruchfestigkeit noch nicht überschritten ist.

Das Fluidkriterium, als zweites Integritätskriterium, gilt als erfüllt, wenn die minimale Hauptspannung im Berechnungsgebiet größer ist als der teufenbezogene berechnete hydraulische Flüssigkeitsdruck (Kriterium 5 in Abb. 29).

Da die Prüfung der Integrität die Unversehrtheit der Barriere beschreibt, müssen auch Nachweise über die Permeabilität, Durchsickerungszeit und Durchflussrate durchgeführt werden. Unter Einbezug der Ergebnisse der Untersuchungen zur Dilatanz, Schädigung und Volumendehnung dürfen die jeweiligen Anforderungswerte (zulässige Permeabilität, zulässige Durchsickerungszeit, zulässige Durchflussrate) während der gesamten Lebensdauer des Barrierebauwerks nicht übersteigen.

- Kriterium 1: Vorhandene Zugspannung < Zugfestigkeit
- Kriterium 2: Vorhandene Druck-/Schubfestigkeit < Bruchfestigkeit
- Kriterium 3: Vorhandene Verzerrungen < Bruchverzerrung
- Kriterium 4: Vorhandene Druck-/Schubspannung < Dilatanzfestigkeit
- Kriterium 5: Vorhandene Minimalspannung > teufenbezogener Fluiddruck
- Kriterium 6: Vorhandene Schädigung < zulässige Schädigung
- Kriterium 7: Vorhandene Volumendehnung < zulässige Volumendehnung
- Kriterium 8: Schubspannungen im Kontaktbereich zwischen Dammbauwerk und umgebendem Gebirge < Scherfestigkeit/Scherwiderstand
- Kriterium 9: Vorhandene Permeabilität < zulässige Permeabilität
- Kriterium 10: Vorhandene Durchsickerungszeit < zulässige Durchsickerungszeit
- Kriterium 11: Vorhandene Durchflussrate < zulässige Durchflussrate

Abb. 29: Kriterien zum Nachweis der Tragfähigkeit (schwarz) und der Barriereintegrität (rot) für ein geotechnisches Verschlussbauwerk und dessen unmittelbar umgebenden Gebirges (nach XIE 2002 / DÜSTERLOH 2013).

8.2.2 Indikatoren und beeinflussende FEP

Bei den im Kapitel 8.2.1 beschriebenen Kriterien werden Indikatoren hinsichtlich vorgegebener Anforderungswerte geprüft. Der Vergleich eines aus Experimenten, Berechnungen und Modellierungen hervorgehenden numerischen Indikatorwertes mit dem jeweilig vorgeschriebenen Anforderungswert ergibt somit eine Bewertung der geotechnischen Sicherheit bezüglich des Untersuchungsaspektes. Eine langzeitsichere Funktionalität ist gewährleistet, wenn unter Einbezug zukünftig eintretender Einwirkungen die Kriterien zum Nachweis der Tragfähigkeit und Barriereintegrität während der gesamten Lebensdauer erfüllt werden.

Bei einer Bauwerksauslegung ist auch die Art der Einwirkung (dynamisch oder statisch, Tab. 3) von Bedeutung. Bei dynamischen Einwirkungen ist das Bauwerk kurzfristigen starken Beanspruchungen ausgesetzt (z.B. beim Einsetzen eines Erdbebens). Es muss gewährleistet sein, dass das Bauwerk diese kompensieren kann. Die meisten FEP-Einwirkungen wirken statisch bzw. statisch veränderlich auf das Verschlussbauwerk ein (Tab. 3). Dadurch ist eine relativ langsame kontinuierliche Beanspruchung an das Bauwerk gegeben. Einige FEP-Einwirkungen können durch Intensivierungen dynamische Auswirkungen erreichen (z.B. Fluiddruck infolge eines Lösungszutritts).

Um eine Aussage darüber treffen zu können, welche Beeinflussungen bzw. Veränderungen der Indikatorwerte sich aus zukünftigen Einwirkungen ergeben, werden im Folgenden die Indikatoren der Kriterien aus Kapitel 8.2.1 mit den FEP-Einwirkungen auf ein Streckenverschlussbauwerk mit einer Lebensdauer von 1.000 Jahren in Bezug gesetzt (Abb. 30).

<u>Indikator</u>	<u>Anforderungswert</u>	<u>Beeinflussende FEP</u>
Zugspannung	zulässige Zugfestigkeit	Alteration, Fluiddruck, ALZ, Therm. Expansion/Kontraktion, Therm. SPÄ im Wirtsgestein, Wärmeproduktion, Änderung des geochem. Milieus
Druck-/Schubspannungen	zulässige Bruchfestigkeit Dilatanzfestigkeit	Alteration, Lageverschiebung, Fluiddruck, Therm. Expansion/Kontraktion, Therm. SPÄ im Wirtsgestein, Wärmeproduktion, Änderung des geochem. Milieus
Verzerrungen	zulässige Bruchverzerrung	
Minimalspannung	teufenbezogener Fluiddruck	Fluiddruck, Wärmeproduktion, Therm. Expansion/ Kontraktion, Therm. SPÄ im Wirtsgestein, Konvergenz
Schädigung	zulässige Schädigung	Fluiddruck, Therm. Expansion/Kontraktion, Therm. SPÄ im Wirtsgestein, Wärmeproduktion, Änderung des geochem. Milieus
Volumendehnung	zulässige Volumendehnung	Fluiddruck, Therm. Expansion/Kontraktion, Therm. SPÄ im Wirtsgestein, Wärmeproduktion, Änderung des geochem. Milieus
Schubspannungen im Kontaktbereich Barriere und Gebirge	zulässige(r) Scherfestigkeit/-widerstand	Lageverschiebung, Konvergenz, Fluiddruck, ALZ, Auflösung, Ausfällung, Therm. Expansion/Kontraktion, Wärmeproduktion, Änderung des geochem. Milieus
Permeabilität	zulässige Permeabilität	Alteration, Kanalisierung, Lageverschiebung, Konvergenz, Fluiddruck, ALZ, Änderung des geochem. Milieus, Auflösung, Ausfällung
Durchsickerungszeit	zulässige Durchsickerungszeit	
Durchflussrate	zulässige Durchflussrate	

Abb. 30: Übersicht über die Indikatoren der Tragfähigkeit und der Barriereintegrität, deren Anforderungswerte und die jeweiligen beeinflussenden FEP für ein Streckenverschlusssystem mit einer Lebensdauer von 1.000 Jahren.

ALZ=Auflockerungszone, SPÄ=Spannungsänderung, Therm.=thermisch, geochem.=geochemisch.

Abb. 30 gibt einen Überblick über die Indikatoren der Tragfähigkeit und der Barriereintegrität aus den ingenieurtechnischen Vorgaben und die zugehörigen Anforderungswerte für die Bauwerksauslegung (Ableitung aus Abb. 29). Sie bilden einen wichtigen Teil der Nachweisführung zur Einhaltung der primären als auch zwei sekundärer und einer tertiären Sicherheitsfunktionen (siehe Kapitel 6, vgl. Abb. 15). Auf der rechten Seite der Abbildung 30 in der Spalte ‚beeinflussende FEP‘ sind die FEP-Einwirkungen angegeben, die die Ausprägung der jeweiligen Indikatoren beeinflussen können und damit bei der Prüfung der Anforderungswerte eingehender betrachtet werden sollten¹⁴. Neben den FEP-Einwirkungen werden dort auch die Auswirkungen aus den FEP-Einwirkungen aufgeführt, da sie in diesem Zusammenhang eine wichtige Rolle spielen können. Die Alteration beispielsweise, beeinflusst durch eine Änderung des geochemischen Milieus, kann eine Verringerung der Festigkeit des Bauwerksmaterials bewirken und den Widerstand – z.B. gegen einwirkende Zugspannungen – herabsetzen. Die Folge ist eine mögliche Rissbildung bei auftreten-

¹⁴ Da Erdbeben einer gesonderten Betrachtung unterliegen, werden sie in dieser Abbildung nicht einbezogen.

den Zugspannungen unterhalb der Zugfestigkeit des Baustoffes ohne Berücksichtigung der FEP-Einwirkung. Eine vorangegangene Lageverschiebung des Verschlussbauwerks, z.B. durch Diapirismus oder den Fluiddruck einer anstehenden Flüssigkeitssäule (Lösungszutritt ins Grubengebäude), ist die Folge einer Übertretung der maximalen Scherspannung und erhöht möglicherweise die sekundäre Permeabilität, Durchlässigkeit und Durchflussrate.

Die Indikatoren der Tragfähigkeit sind Zug-, Druck- und Schubspannungen (hinsichtlich Bruch- und Scherfestigkeit) und Verzerrungen (Abb. 29, Abb. 30). Spannungen bzw. Spannungsfelder werden durch eine Änderung ihrer Umgebungsbedingungen beeinflusst. Dementsprechend sind dahingehende FEP bei den Indikatoren der Tragfähigkeit zu berücksichtigen (Abb. 30). Die meisten Gesteine besitzen generell eine kleine und sehr streuende Zugfestigkeit, die sich bei Wärmeeinfluss ändert. Bereits bei unterschiedlichen Salzarten treten Unterschiede im Kriechverhalten auf, wobei an deren Kontaktflächen Zugspannungen auftreten (HUNSCH ET AL. 2003). Daher könnten besonders der Kontaktbereich von unterschiedlichen Materialien (z.B. Bauwerk und Salzgestein) und die Auflockerungszone nicht nur für Schubspannungen, sondern auch für eine Rissbildung infolge Zugspannungen anfällig sein. Da die durch die FEP-Einwirkungen hervorgerufenen Spannungsänderungen im Zusammenhang mit der Wärmeproduktion stehen, wird sich das Spannungsfeld relativ langsam ändern. Es ist daher anzunehmen, dass ausgeprägte Rissbildungen aus Druckspannungen und Verzerrungen weniger relevant sein werden. Korrosionsprozesse, hervorgerufen durch eine Änderung des geochemischen Milieus, können die Materialfestigkeit und somit den Widerstand gegen auftretende Spannungen verringern. Unter den ausgewählten FEP-Einwirkungen können Zug-, Druck- und Schubspannungen sowie Verzerrungen durch die FEP „Thermische Expansion/Kontraktion“, „Thermische Spannungsänderung im Wirtsgestein“ und „Fluiddruck“ (Flüssigkeitssäule durch Lösungszutritt ins Grubengebäude, Fluide im Porenraum) entstehen. Hervorgerufen oder beeinflusst werden die FEP-Einwirkungen mit Ausnahme der FEP-Einwirkung „Lösungszutritt ins Grubengebäude“ durch die Wärmeproduktion. Schubspannungen können auch zu einer Lageverschiebung des Verschlussbauwerks führen. In diesem Zusammenhang müssen die Scherfestigkeiten geprüft werden. Die Schubspannungen könnten z.B. durch den Fluiddruck in Form einer einseitig anstehenden Flüssigkeitssäule ausgelöst werden. Auflösungen im Kontaktbereich können den Scherwiderstand senken, Ausfällungen hingegen möglicherweise erhöhen. Bei der Bestimmung der Scherfestigkeit spielen das thermische Verhalten der Materialien (infolge Wärmeentwicklung aus radioaktiven Abfällen), gleichzeitig wirkende Spannungsänderungen aus den FEP „Thermischen Expansion/Kontraktion“ und „Thermische Spannungsänderung im Wirtsgestein“ (aus denen ebenfalls Scherspannungen entstehen können) als auch ein möglicher Einschluss des Bauwerks in das Gebirge durch die Konvergenz (erhöht durch Temperaturanstieg) eine Rolle.

Die Indikatoren der Barriereintegrität sind insbesondere die Permeabilität, Durchsickerungszeit und Durchflussrate als auch Druck- und Schubspannungen (hinsichtlich Dilatanz- und Scherfestigkeit als auch Schädigungsrate), Minimalspannung und Volumendehnung. Durch die Indikatoren der Barriereintegrität werden daher die Prozesse, die zu Mikrofissuren oder Rissen führen können, und der hydraulische Widerstand der Barriere charakterisiert. Eine ausgeprägte Rissbildung kann auch zur Verminderung der Tragfähigkeit beitragen.

Die Indikatoren der Barriereintegrität werden wie die der Tragfähigkeit langfristig durch Veränderungen der Temperatur, des geochemischen Milieus und des Fluiddruckes beeinflusst (Abb. 30). Temperaturveränderungen rufen z.B. Spannungsänderungen und Volumenänderungen durch die FEP „Thermische Expansion/Kontraktion“, „Thermische Spannungsänderung im Wirtsgestein“ und „Fluiddruck“ (Fluide im Porenraum) hervor. Das durch die Temperatur beeinflusste geochemische Milieu führt zu Korrosionsprozessen und kann die Widerstandskraft des Barrierebauwerks gegenüber einwirkenden Spannungen mindern. Des Weiteren verändern die in diesem Zusammenhang zu betrachtenden Auflösungen bzw. Ausfällungen den hydraulischen Widerstand.

Dies könnte durch mögliche Fissuren infolge eines ansteigenden Fluiddrucks zu einer Kanalisierung im Dichteelement oder im Bereich der Kontakt- und Auflockerungszone führen. Möglicherweise könnte die durch einen Temperaturanstieg verstärkte Konvergenz eine Kanalisierung im Kontaktbereich und der Auflockerungszone verhindern. Der Fluiddruck erzeugt in den geschädigten und aufgelockerten Konturbereichen einen Porenwasserdruck, der einer Rissrückbildung der Auflockerungsbereiche entgegenwirkt und somit die Schädigungs- und Dilatanzrückbildung verlangsamt (EBERTH 2008).

Die Anforderungswerte der jeweiligen Indikatoren sind in Spalte 2 der Abb. 30 dargestellt. Die Festlegung der Anforderungswerte beruht auf den Materialparametern, die den Widerstand (Festigkeit) des Bauwerks und Gesteins beschreiben und der Höhe der Einwirkung (Spannung) bezogen auf die Anforderungen an das Verschlusssystem hinsichtlich der Lebensdauer und der Langzeitsicherheit. Ausschlaggebend ist dabei, welche zeitliche (Beginn/Ende) Funktionalität des Bauwerks angesetzt wird. Bei einer langzeitlichen Betrachtung eines Streckenverschlusses in einem Endlager für wärmeentwickelnde Stoffe treten Einwirkungen auf, die die Festigkeit beeinflussen und damit den Widerstand senken (z.B. Änderung des geochemischen Milieus). Bei später einsetzenden Einwirkungen genügt dann ggf. eine verminderte geringere Intensität, um die Festigkeitsgrenzen zu überschreiten. Deshalb ist es notwendig neben den Indikatoren für die Einwirkung (Spannungsüberprüfung) auch die Veränderungen der Widerstandskraft mit der Zeit (Festigkeitsüberprüfung) eingehend zu überprüfen, da sich die Höhe des anfänglich festgelegten Wertes durch die Festigkeitsabnahme infolge von Rissbildungen und Alteration des Bauwerks verringert.

Die FEP-Einwirkungen auf einen Streckenverschluss mit einer Lebensdauer von 1.000 Jahren sind zeitlich variabel. Ihr Auftreten und ihre Intensität sind von auslösenden Faktoren und Interaktionen abhängig (siehe Kapitel 7.2, 7.4). Das zeitliche Auftreten und ihr Intensitätsgrad beeinflussen die Ausprägung der Spannungsumlagerung, die auf einen Streckenverschluss einwirken. Die Veränderung der Höhe der Einwirkung auf das Bauwerk legt die Anforderungen an die Materialbeschaffenheit und damit an den Widerstand für die jeweiligen Zeiträume fest. Es ist unvermeidbar, dass ein Festigkeitsverlust des geotechnischen Bauwerks mit der Zeit eintritt. Der Einbezug relevanter Einwirkungen und Auswirkungen bei der Indikatorenprüfung legt Anforderungen an die notwendige Widerstandsfähigkeit fest, wodurch eine Festigkeit gewährleistet wird, die den auftretenden Einwirkungen innerhalb der festgelegten Lebensdauer des Bauwerks ausreichend entgegenwirken kann.

Die Festlegung der Anforderungswerte beruht demnach auf den sich verändernden Materialparametern und der Ausprägung der Einwirkungen in der Nachverschlussphase. Dabei sind u.a. die Interaktionen der FEP-Einwirkung (Einwirkungskombination) und die Alteration des Bauwerkmaterials zu berücksichtigen. Die zu prüfenden Spannungskriterien gelten bei der Vorbemessung als erfüllt, wenn die auftretenden Spannungen unterhalb des Anforderungswertes, der sich durch die Verringerung der Festigkeit infolge der Alteration verändert, liegen.

Die Aspekte Spannungseinwirkung und Festigkeit einschließlich der Berücksichtigung langzeitlicher Veränderungen werden mit den Indikatoren der Tragfähigkeit und Barriereintegrität unter Einbezug der in Kapitel 6 vorgestellten Funktionsindikatoren FI ‚Gebirgsdruck‘, FI ‚Fluiddruck‘ und FI ‚Konvergenzrate‘ sowie unter der Voraussetzung einer der Spannungsermittlung vorausgegangenen Betrachtung der festigkeitsbeeinflussenden chemischen Untersuchungen unter Beachtung der Funktionsindikatoren FI ‚pH-Eh-Wert‘, FI ‚Temperatur‘, FI ‚Auflösungs-Ausfällungsrate‘ und FI ‚Korrosionsrate‘ berücksichtigt.

8.3 Langzeitliche Einwirkungen und Auswirkungen auf einen Streckenverschluss

Im Kapitel 8.2 wurden bereits die langzeitlichen Einwirkungen auf einen Streckenverschluss mit einer Lebensdauer von 1.000 Jahren im Zusammenhang mit den ingenieurtechnischen Indikatoren für die Tragfähigkeit und Barriereintegrität diskutiert. Das zeitliche Auftreten und die Interaktion der Einwirkungen untereinander sowie ihre Ausprägung bestimmen die Wirkung der Spannungen auf das Streckenverschluss-System. Ausschlaggebend für eine Kompensation der einwirkenden Spannungen und damit für eine Vermeidung von Rissbildungen ist der Widerstand, den die Materialien den Einwirkungen entgegensetzen können. Die Art und die Ausprägung der Einwirkung sind genauso entscheidend wie die festigkeitsvermindernden Prozesse, um die aus den Einwirkungen resultierenden Auswirkungen bestimmen zu können. Für die Langzeitsicherheitsbetrachtungen werden dafür Prognose-Rechnungen durchgeführt, bei denen Wechselwirkungen zwischen thermischen, hydraulischen, mechanischen und chemischen Einflüssen (THMC-Prozesse) berücksichtigt werden müssen.

Eine detaillierte Ansprache der einzelnen Aspekte ist an dieser Stelle nicht sinnvoll, da diese nur anhand eines Endlagerkonzept vorgenommen werden sollten. Im Folgenden werden die Einflüsse der Temperaturveränderungen (verursacht aus den eingelagerten wärmeentwickelnden Abfällen) und des geochemischen Milieus eingehender betrachtet, da sie andere FEP-Einwirkungen stark beeinflussen und dominierende Größen für eine Festigkeitsverminderung darstellen.

8.3.1 Einfluss der Temperatur aus dem radioaktiven Zerfall des Abfalls

Der Einfluss der Temperaturveränderungen aus den eingelagerten wärmeentwickelnden Abfällen ist innerhalb der ersten 1.000 Jahre ein ausschlaggebender Parameter (siehe Kapitel 7). Für einen Nachweis des Funktionserhalts eines Streckenverschlusses sind Untersuchungen zum Verhalten des geotechnischen Bauwerks und seinen Wechselbeziehungen mit dem es umgebenden Gebirge bei Temperaturveränderungen sowie verhaltensbeeinflussenden Prozessveränderungen (z.B. Alteration durch Änderung des geochemischen Milieus) erforderlich. Aus der Zusammensetzung der Bauwerksmaterialien und des Wirtsgesteins ergeben sich Parameter wie z.B. die spezifischen Wärmekapazitäten, Wärmeleitfähigkeiten und Ausdehnungskoeffizienten. So ist beispielsweise die Bestimmung des spezifischen Wärmeleitkoeffizienten, welcher selbst temperaturabhängig ist, notwendig, um eine Aussage über die Zeitpunkte des Temperaturanstiegs und -abfalls sowie der Maximaltemperatur in der Umgebung des Verschlussystems treffen zu können.

Viele physikalische Größen sind temperaturabhängig. Aus den durch die Wärmeleistung der eingelagerten wärmeentwickelnden Abfälle verursachten Temperaturanstieg und -abfall resultieren Prozesse, die in den verwendeten Stoffmodellen bei numerischer Simulation zu berücksichtigen sind. In diesem Zusammenhang müssen neben der temperaturabhängigen Änderung der Dichte mindestens die folgenden sicherheitsrelevanten Aspekte unter Berücksichtigung der tatsächlich auftretenden Temperatur bei der Auslegung eines Streckenverschlusses betrachtet werden.

Zustandsänderungen der Bauwerksmaterialien und des umgebenden Gebirges

Durch eine Temperaturerhöhung wird eine Längen- bzw. Volumenänderung bei festen Körpern und Flüssigkeiten eintreten. Die Prüfung der maximalen Ausdehnung der Bauwerksmaterialien und des umgebenden Salzgesteins gibt Kenntnis über die maximal mögliche Höhe der Temperatur, Dilatanz- und Bruchfestigkeiten. Bei Untersuchungen über Zustandsänderungen ist neben der separaten Komponentenbetrachtung auch die Wechselwirkung zwischen der technischen Konstruktion und dem umgebenden Gebirge von Bedeutung. Temperaturerhöhungen bewirken eine Erhöhung der Viskosität des Salzgesteins. Es wird somit fließfähiger und begünstigt die

Konvergenz. Eine Erhöhung der Kriechrate ist mit einer signifikanten Deformation verbunden. In diesem Zusammenhang sollte der Verlauf der Deformation einschließlich der parallel ablaufenden Prozesse der Volumenausdehnung des Bauwerks und der Konvergenz geprüft werden. Bei der Untersuchung von Zustandsänderungen sollten auch vorhandene Fluide (Gase und wässrige Lösungen in Poren- und Hohlräumen, oder anstehende Lösungen) einbezogen werden. Dabei ist zu beachten, dass sich eingeschlossene Fluide wesentlich stärker als Festkörper ausdehnen können. Es sollte geprüft werden, ob der Fluiddruck die Materialfestigkeiten überschreiten kann.

Die Untersuchung von Zustandsänderungen ist sicherheitsrelevant, weil eine mögliche Mikro- und Makrorissbildung zu sekundären Wegsamkeiten und damit einer Erhöhung der Sekundärpermeabilität führen kann. Durch die Untersuchungen werden die Grenzwerte der Bruchfestigkeit, Dilatanzfestigkeit und Volumendehnung festgelegt.

Änderung der Löslichkeit

Zum Lösen eines Feststoffes in einer Flüssigkeit wird eine bestimmte Wärmemenge benötigt. Ist eine Lösung gesättigt, wird kein weiterer Feststoff gelöst. Durch einen Temperaturanstieg steigt die Löslichkeit an einigen Komponenten, d.h. es lassen sich weitere Mengen dieser Stoffe lösen. Kühlt solch eine Lösung wieder ab, kristallisieren Festkörper wieder aus. Eine Temperaturerhöhung, hervorgerufen aus den wärmeentwickelnden Abfällen, könnte partiell Auflösungsprozesse am Bauwerk oder im Salzgestein begünstigen. Besonders in den Schwächezonen könnten dadurch Wegsamkeiten entstehen, die zu Umläufigkeiten oder Kanalisierungen führen, die ihrerseits der Festigkeit und der Integrität des Bauwerks entgegenwirken. Bei einem Temperaturabfall könnte es zu Ausfällungserscheinungen kommen, die zum Verschluss möglicher Hohlräume oder Risse beitragen könnten.

Durch die Änderung der Löslichkeit kann demnach bis zum Erreichen des Temperaturmaximums durch Auflösungsprozesse die Funktionsfähigkeit des Verschlussbauwerks eingeschränkt bzw. verletzt werden. Bei einem Abfall der Temperatur können Ausfällungen mögliche Wegsamkeiten verschließen, wodurch die Funktionsfähigkeit erhalten bleibt bzw. wiederhergestellt werden könnte.

Änderung der Luftfeuchte

Durch die Änderung des Aggregatzustandes der im Grubengebäude befindlichen wässrigen Lösungen, wie z.B. Eigenfeuchte des Bauwerks und Gesteins oder des eingebrachten Salzgrusversatzes, kann es infolge einer Temperaturerhöhung und der untertägigen Druckverhältnisse zum Anstieg der Luftfeuchtigkeit kommen. Die feuchte Luft wird am Bauwerk oder am Salzgestein kondensieren. Es muss geklärt werden, ob diese H₂O-Kondensationen nur oberflächliche zu vernachlässigende Alterationen oder aggressive chemische Reaktionen an den Kondensationsorten hervorrufen können, wodurch sich einerseits das geochemische Milieu ändern und es andererseits zu lokalen Auflösungen kommen könnte. Eine daraus hervorgehende verstärkte Alteration des Bauwerks könnte eine Abnahme der Festigkeit in den randlichen Bereichen des Bauwerks bewirken, wodurch die Funktionsfähigkeit des Barrierebauwerks z.B. durch Kanalisierungen eingeschränkt bzw. verletzt werden kann.

Ausbildung thermisch induzierter Spannungen

Bei der thermischen Entwicklung können, aufgrund einer Behinderung der thermisch induzierten Ausdehnung des Gesteins und der Bauwerksmaterialien – zusätzlich zu dem bereits bestehenden Sekundärspannungszustand durch die Auffahrung – sogenannte Thermo-Spannungen auftreten. Diese werden aufgrund des Temperaturgradienten vor allem im konturnahen Bereich wirksam. Um daraus resultierende Auswirkungen abschätzen zu können, ist die Kenntnis über die thermisch induzierte Spannungshöhe und -art notwendig. Wichtig ist dabei, die mögliche Temperaturverteilung (einschließlich der Überlagerung von Temperaturfeldern) im Bauwerks- und Wirtsgesteins-

bereich zu kennen. Thermisch induzierte Spannungen sollten separat und in Kombination zu anderen möglichen Spannungsbeeinflussungen untersucht werden.

Da diese Spannungen mit dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Materialien oder auch Materialkombinationen im Zusammenhang stehen, können sie mechanische Verformungen bewirken, d.h. elastische oder elastisch-plastische Dehnungen oder Stauchungen, wodurch Wegsamkeiten entstehen können und die Funktion des Barrierebauwerks einschränken.

Änderung der Schädigungsrate

Eine Überprüfung der Schädigungsintensität (quantitatives Maß für die Rissentwicklung nach Überschreitung der Gefügefestigkeit) gibt eine Einschätzung der Neigung zur Bildung von Sekundärwegsamkeiten. Eine Gefügeänderung entspricht einer zusätzlichen Porosität, die zur Ausbildung einer Sekundärpermeabilität führen kann (Hou 2002). Mit steigender volumetrischer Verzerrung des Gesteins oder des Bauwerks nehmen derartige Gefügeschädigungen zu. Folge einer voranschreitenden Gefügeschädigung, die gleichzeitig eine Entfestigung und daraus resultierend eine Tragfähigkeitsabnahme bedeutet, ist eine Vernetzung der Sekundärmikrorisse, die Wegsamkeiten für Fluide und damit Umläufigkeiten oder Kanalisierungen hervorrufen können (Hou 2002 / XIE 2003). Die wegen der Wärmeentwicklung der eingelagerten Abfälle zeitabhängigen Temperaturfelder beeinflussen einerseits die Kriechparameter und führen andererseits zu thermisch induzierten Druck- und Zugspannungen im Barriersystem. Inwieweit eine Temperaturerhöhung auch bei weiterer Entfernung im Bereich des Verschlusssystems die Dilatanz und die Schädigungsrate beeinflusst und inwieweit sich ein temperaturgebundenes verstärktes Kriechvermögen darauf auswirkt bzw. zu weiteren Spannungsumlagerungen führt, ist standortbezogen zu prüfen. Außerdem kann eine Temperaturerhöhung eine Veränderung des geochemischen Milieus bewirken, welches seinerseits die Alteration und somit die Festigkeit des Bauwerks beeinflussen könnte und damit Einfluss auf den Bauwerkswiderstand gegenüber Zugspannungen hat. Ausschlaggebend für die Untersuchung der oben genannten Aspekte sind die Entfernung des Verschlusssystems von der Wärmequelle und damit der Zeitpunkt signifikanter Temperaturerhöhung und -abfalls am Bauwerk.

8.3.2 Änderung des chemischen Milieus

Die Betrachtung der Änderung des geochemischen Milieus ist neben der Temperaturveränderung eine weitere wichtige Komponente bei einem Nachweis der Funktionalität eines Verschlussbauwerks. Die Zusammensetzung und die Veränderung der geochemischen Umgebungsbedingungen über die Zeit gibt Rückschluss auf das Voranschreiten und die Ausmaße der Alteration des Verschlussbauwerks.

Das geochemische Milieu wird durch vorhandene Fluide und deren Zusammensetzung bestimmt. Die im Grubenraum vorhandenen wässrigen Lösungen lösen bis zu ihrer Sättigung anstehende Festkörper (Bauwerk und Salzgestein). Bei einer gesättigten Lösung bildet sich ein Gleichgewicht zwischen gelöster Phase und den ungelösten Materialien. Eine genaue Zusammensetzung der Lösungen ist nur begrenzt vorhersagbar. Die Lösung wird aus Ionen des Herkunftsortes (bei salzstockexternen Lösungen), des anstehenden Salzgesteins, den Bauwerksmaterialien und den Korrosionsprodukten weiterer im Grubengebäude verbliebender Materialien (z.B. Metalle von Schienen und Ankern) bestehen. Für die Prognose der Entwicklung des geochemischen Milieus sind neben den Randbedingungen (Temperatur, Druck, ursprüngliche Lösungszusammensetzung, usw.) auch die Zusammensetzung des Salzgesteins und der Bauwerksmaterialien ausschlaggebend. Besteht das Bauwerk (wie in aktuellen Konzepten – BOLLINGERFEHR ET AL. 2011) aus einem Magnesiabinder (Sorelbeton), ist die Kenntnis über die Sorelbetonzusammensetzung (einschließlich Zuschlagstoffe) genauso wichtig wie die Kenntnis über die vorherrschenden

Sorelphasen. Magnesiabinder gelten gegenüber MgCl_2 -gesättigter Lösung als stabil, korrodieren aber z.B. in Kontakt mit NaCl -dominierter Lösung (ausführlichere Beschreibungen in Kapitel 9). Werden portlandzementbasierte Baustoffe (z.B. Salzbeton) verwendet, sind diese zwar im Gegensatz zu den Magnesiabindern gegenüber gesättigten NaCl -Lösungen weitestgehend stabil, zeigen aber im Kontakt mit halbgesättigten NaCl -Lösungen Herauslösungen des Steinsalzzuschlags und mit Mg -reichen Lösungen Auflösungen der Zementphasen (MEYER ET AL. 2003). Die Korrosionserscheinungen werden durch einen Stofftransport zwischen der Zementporenlösung und der salinaren Lösung hervorgerufen (METZ ET AL. 2006B). Dabei dringen hauptsächlich Cl^- , SO_4^{2-} - und Mg^{2+} - Ionen in die Zementporen ein, während vorwiegend OH^- und Ca^{2+} - Ionen aus dem Zementprodukt nach außen diffundieren (METZ ET AL. 2006B). So wird z.B. das Kalzium aus dem Zement herausgelöst und durch Magnesium ersetzt, wodurch – wie auch bei einem Eindringen von freiem Chlorid in den Zement – u.a. eine Auslaugung von Portlandit aus der Zementmatrix erfolgt (KIENZLER & VEJMEKKA 1998 / THIENEL 2008). Die Folge ist u.a. eine kalziumreichere angreifende Lösung (pH-Wert-Änderung), eine Vergrößerung des Porenraumes und eine fortschreitende Instabilität der Zementphasen des Salzbetons. Die durch eine Änderung des geochemischen Milieus einsetzenden Korrosionsprozesse sind damit für die Stabilität (Widerstand gegen Druck- und Zugspannungen) und die Durchlässigkeit (Porosität, Permeabilität) des Bauwerks von Bedeutung. Experimente von KIENZLER & VEJMEKKA (1998) zeigen, dass nach den Korrosionsprozessen von Portlandzementen durch salinare Lösungen die festigkeitsbildenden CSH-Phasen (Kalziumsilicathydraten) u.a. unter Bildung von Magnesiumoxichlorid, Magnesiumsilikat, Polyhalit und Anhydrit vollständig zerstört wurden.

Im Allgemeinen hängt die Korrosionsbeständigkeit von der Mikroporosität ab (KIENZLER & VEJMEKKA 1998). Des Weiteren ist von Bedeutung, ob das Bauwerk unter den gegebenen Bedingungen aushärtet oder austrocknet. Bei einem ausgehärteten Bauwerk finden durch die unterschiedlichen Konzentrationsgradienten der auftretenden Lösung und der Lösung in den Porenräumen des Zementes sofort diffusiv kontrollierte Austauschprozesse statt (KIENZLER & VEJMEKKA 1998).

Darüber hinaus sind weitere Aspekte der Entwicklung des geochemischen Milieus unter Normalbedingungen zu beachten. Eine Temperaturveränderung, wie sie innerhalb der ersten 1.000 Jahre in einem Endlager für wärmeentwickelnde Stoffe zu erwarten ist, kann die ablaufenden Prozesse und somit die Entwicklung des geochemischen Milieus verändern. Beispielsweise verlaufen aerobe und anaerobe Korrosionsprozesse an im Grubenraum verbliebenden Komponenten (z.B. an Metallen¹⁵) schneller, Kondensationen lösen andere Minerale als salinare Lösungen und bei anstehenden salinaren Lösungen kann die Lösungsfähigkeit erhöht werden. Dadurch ist mit einer Veränderung der Auflösungs- und Ausfällungsvorgänge und möglicherweise mit einer erhöhten Alterationsgeschwindigkeit oder Kanalisierungen zu rechnen. Die Löslichkeit und damit die Bauwerkskorrosion sind neben den Temperatur- und Druckverhältnissen auch von der Ionenstärke abhängig. Damit sind die Zusammensetzung anstehender Lösungen und deren Veränderung durch Umlösungsprozesse von großer Bedeutung. Durch Untersuchungen der Änderung des geochemischen Milieus können anhand von Berechnungen und experimentellen Bestimmungen die Löslichkeit und die Alteration des verwendeten Materials bestimmt werden. Dies gibt Aufschluss über die Diffusions- und Lösungsfronten. Die Kenntnis darüber ist notwendig, um bei der Bauwerksauslegung eine ausreichende Opferschicht zur Berücksichtigung von Korrosionsprozessen einzuplanen.

¹⁵SCHON & HEIDENDAEL (1998) beschreiben, dass der im Endlager zunächst noch vorhandene Luftsauerstoff schnell durch Korrosionsreaktionen aufgezehrt wird und die danach stattfindende Korrosion unter anaeroben Bedingungen abläuft. Der Reaktionspartner für das Eisen ist dabei Wasser, das im Endlager als Restfeuchte in der Luft, im Salz oder als Einschluss von gesättigten Lösungen (Salzlösungseinschluss) vorliegen kann oder durch einen Zutritt von ungesättigten Lösungen (Lösungszutritt von über Tage) ins Endlager gelangt. Bei der anaeroben Korrosion von Eisen wird als Reaktionsprodukt gasförmiger Wasserstoff gebildet. Die Bildungsraten sind u.a. in Abhängigkeit von der Temperatur unterschiedlich.

8.4 Vorschlag einer erweiterten Vorgehensweise bei der Vorbemessung eines geotechnischen Streckenverschlussbauwerks

Bei der Sicherheitsüberprüfung (Vorbemessung) und im ingenieurtechnischen Sicherheitsnachweis (Bemessung) für ein geotechnisches Verschlussystem ist unter Einbeziehung der zeitlichen Veränderlichkeit der Einwirkungsausprägungen einschließlich ihrer Interaktionen und der Festigkeitsabnahme zu belegen, dass die Sicherheitsfunktionen zu jedem Zeitpunkt gegeben sind. Aus der Identifizierung der FEP für eine Vorbemessung und deren eingehender Betrachtung, aus der hervorgeht, dass sich die mechanischen, hydraulischen, chemischen und thermischen Einwirkungen nur chemisch und mechanisch auf den Streckenverschluss auswirken, als auch aus den Betrachtungen von FEP-Beeinflussungen der zu prüfenden Eigenschaften und Indikatoren wird deutlich, dass als dominierende Einflussgrößen die Temperatur, das geochemische Milieu und die auftretenden Spannungen zu berücksichtigen sind.

Wie im Kapitel 5 beschrieben, kann im Rahmen einer vereinfachten Vorgehensweise eine Vorbemessung eines Verschlussbauwerks aus Gründen der Handhabbarkeit eine ent- bis teilgekoppelte Prozessbetrachtung erfolgen. Die Interaktionen werden dementsprechend so weit wie möglich vereinfacht und die Auswirkungen in separaten aufeinanderfolgenden Temperatur-, Geochemie- und Spannungsberechnungen jeweils für den gesamten Funktionszeitraum, unter Einbezug der vorangegangenen Ergebnisse, geprüft (**Methode 1**). Das bedeutet, dass die Daten der Widerstandskraft (geochemisches Milieu) und die (teilweise durch die Temperaturentwicklung beeinflussten) Spannungshöhen zunächst separat betrachtet werden und im Anschluss eine Überprüfung der Spannungshöhe mit der jeweiligen zeitlichen Festigkeit des Verschlussbauwerks erfolgt. Die Basis der Methode 1 (vereinfachte Methode) bildet eine Temperaturberechnung mit vier Entwicklungsstufen: (t_1) Zeitpunkt der beginnende Wärmeentwicklung im Nahfeld des Einlagerungsbereiches, (t_2) Zeitpunkt, bei dem erste messbare Temperaturänderungen am Verschlussbauwerk auftreten, (t_3) Zeitpunkt der maximalen Temperaturerhöhung am Bauwerk, (t_4) Zeitpunkt der Einstellung der ursprünglichen Temperaturbedingungen in der Umgebung des Verschlussbauwerks (Kapitel 7.3). Aufbauend auf den Ergebnissen zur Temperaturentwicklung und den Temperaturmaxima kann eine separate Berechnung über die geochemische Milieuveränderung durchgeführt werden, um die Festigkeitsverringerung des Verschlussbauwerks darzustellen. Die gelieferten Daten bestimmen die Materialkennwerte und die Fluidzusammensetzung. Diese können dann mit den Ergebnissen der Modellierung über die aus den FEP-Einwirkungen resultierenden Spannungsänderungen verglichen werden. Überschreiten die einwirkenden Spannungen die Festigkeit zum jeweilig betrachteten Zeitpunkt, muss unter Berücksichtigung von Ungewissheiten entweder die Materialzusammensetzung oder der konzeptionelle Aufbau (Design) geändert werden. Es erfolgt eine iterative Ermittlung der Materialparameter und damit der Anforderungswerte, die im Sicherheitsnachweis der Vorbemessung geprüft ggf. optimiert und in der nachfolgenden Bemessung verifiziert werden.

In den Kapiteln 7 und 8 wird deutlich, dass in der Realität mehrere Prozesse und Einwirkungen gleichzeitig ablaufen (Einwirkungskombination) und sich gegenseitig beeinflussen. Ihr Auftreten und ihre Ausprägung sind von auslösenden Faktoren und Interaktionen abhängig. Dies kann sich auch auf die Indikatoren auswirken. Eine Möglichkeit, die Ausprägung der FEP-Einwirkungen und ihre Beeinflussung eines geotechnischen Bauwerks optimiert in die Auslegung einzubringen ist, die FEP-Einwirkungen nach ihrem zeitlichen Eintreten zu sortieren und in die jeweilig folgenden FEP-Einwirkungen die Auswirkungen der vorangegangenen FEP-Einwirkungen (Festigkeitsverlust durch chemische und mechanische Schädigung) einzubeziehen. Um dies zu berücksichtigen und um die Iterationskreisläufe im Rahmenkonzept zu verringern und damit ein effizienteres Vorgehen zu ermöglichen, wird an dieser Stelle eine erweiterte Vorgehensweise vorgestellt (**Methode 2**). Diese

könnte auch als Bemessungsmethode verwendet werden. Bei der Methode 2 (erweiterte Methode) liegt das Augenmerk auf einer umfassenden Einbeziehung von Widerstandsverringerungen und der möglichen schwankenden Intensität der langzeitlichen Einwirkungen. Während bei der Methode 1 aufeinanderfolgende separate Betrachtungen jeweils für den gesamten Funktionszeitraum durchgeführt werden und daher nur der Widerstandsverlust durch geochemische Berechnungen berücksichtigt wird, unter dessen Einbezug die Überprüfung der Materialfestigkeit innerhalb der Spannungsberechnungen erfolgt, wird bei der Methode 2 eine in Zeitabschnitte unterteilte Parallelbetrachtung durchgeführt, wodurch sekundären Porositäten, z.B. aus Dilatanz und Rissbildungen, und die damit verbundene erhöhten Korrosionsmöglichkeiten einbezogen werden. Dabei werden die Ein- und Auswirkungen innerhalb der jeweils zu betrachtenden Phase der Temperaturveränderung untersucht und das Ergebnis des Festigkeitsverlustes (Widerstand) als Ausgangspunkt für die Betrachtungen der darauffolgenden Temperaturentwicklungsphase angesehen. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine genauere Bestimmung der Einwirkungsintensität und des Festigkeitsverlustes und damit auch der Materialgrenz- und Anforderungswerte.

Im Folgenden wird ein Vorschlag solch einer erweiterten Vorgehensweise vorgestellt, die ggf. in einer gesonderten Arbeit vertieft werden könnte. Für Methode 2 erfolgen an dieser Stelle die Prüfungen in folgender Reihenfolge:

1.) *Temperaturentwicklungsphase*: Temperaturanstieg im Nahfeld der Einlagerung

Ablaufende Prozesse und Einwirkungen:

- A) Konvergenz setzt ein.
- B) Gleichzeitig werden durch den Temperaturanstieg im Nahfeld des Einlagerungsbereiches thermisch bedingte Spannungsänderungen im Wirtsgestein hervorgerufen, die (Zug-) Spannungsänderungen am Bauwerk bewirken können.
- C) Alterationsprozesse setzen ein.

Prüfung:

- A) Höhe der aus der Konvergenz resultierenden Spannungsumlagerungen und deren Auswirkungen auf das Bauwerk
- B) Höhe der thermisch bedingten (Zug-) Spannungsänderungen und deren Auswirkung auf das Verschlussystem
- C) Veränderung des geochemischen Milieus unter Einbeziehung der wässrigen Lösungen, beginnender Metallkorrosion, Sauerstoffverbrauch, etc. und der normalen Alterationsprozesse
- D) Permeabilität und Durchlässigkeit für die einzelnen Bereiche des Verschlussystems (Auflockerungszone, Kontaktzone, geotechnische Konstruktion) unter Einbezug auftreten der FEP-Einwirkungen (Kapitel 8.2.2)
- E) Ergebnisse der Prüfungen A bis D im Zusammenhang mit einem Lösungszutritt ins Grubengebäude und den dadurch veränderten FEP-Einwirkungen

2.) *Temperaturentwicklungsphase*: Temperaturanstieg am Verschlussystem

Ablaufende Prozesse und Einwirkungen:

- A) Die Temperaturerhöhung am Verschlussystem bewirkt eine Erhöhung der Konvergenz, Spannungsumlagerungen ausgelöst werden.

- B) Zeitgleich verändert sich das geochemische Milieu. Das dadurch veränderte Lösungsverhalten kann Auflösungen am Bauwerk, am Umgebungsgestein und an den Schwäche-zonen begünstigen. Diese verstärkten Korrosionsprozesse führen zu einer weiteren Veränderung des geochemischen Milieus und zum Festigkeitsverlust des Barriere-systems.
- C) Die Metallkorrosionsprozesse verstärken sich.

Prüfung:

- A) Veränderung bzw. Höhe der Konvergenzrate; Spannungsumlagerungen und Verschluss von Hohlräumen durch die Konvergenz unter Einbezug des Fluiddrucks
- B) Veränderung des geochemischen Milieus, einschließlich der Art von Auflösungen und Ausfällungen, den Vorschritt der Korrosionsfront, der Zusammensetzung der Lösungen, der Ausmaßen der Metallmetallkorrosion sowie die Bestimmung des pH-Wertes (Rück-schluss auf die Alterung des vorhandenen Materialien und der Korrosionsraten)
- C) Ausprägung von thermisch bedingten Spannungen und deren Auswirkung auf das Verschlussystem
- D) Permeabilität und Durchlässigkeit für die einzelnen Bereiche des Verschlussystems (Auflockerungszone, Kontaktzone, geotechnische Konstruktion) unter Einbezug auftreten-der FEP-Einwirkungen (Kapitel 8.2.2)
- E) Ergebnisse der Prüfungen A bis D im Zusammenhang mit einem Lösungszutritt ins Grubengebäude und den dadurch veränderten FEP-Einwirkungen

3.) *Temperaturentwicklungsphase:* Temperaturmaximum am Verschlussystem

Ablaufende Prozesse und Einwirkungen:

- A) Mit dem Erreichen des Temperaturmaximums ist auch die maximale Löslichkeit bestimmter Komponenten gegeben. Unter Einbeziehung von Kondensation und maximaler Metallkorrosion erreicht der Einfluss der Änderung des geochemischen Milieus auf eine Alteration des Bauwerks seinen Höhepunkt.
- B) Die fortschreitende Korrosion am Bauwerk bestimmt die Festigkeiten. Zu diesem Zeitpunkt ist die maximale Volumenausdehnung bezüglich Dilatanz und Rissbildung zu erwarten.
- C) Die maximale Temperatur bewirkt erhöhte Konvergenz- und Fluiddruckeinflüsse.

Prüfung:

- A) Veränderung des geochemischen Milieus einschließlich der Zusammensetzung der wässrigen Lösungen durch Kondensation, Zufuhr von Metallkorrosionsprodukten und der veränderten Auflösungen; Mächtigkeit der Korrosionsfront im Bauwerk; Auflösungen in den Schwäche-zonenbereichen
- B) Ausprägung von thermisch bedingten Spannungen und deren Auswirkung auf das Verschlussystem; bestimmend dabei sind das maximale Ausdehnungsvolumen und dessen Spannungsänderungen von Material und Umgebungsgestein unter Einbeziehung des Festigkeitsverlustes infolge der veränderten Milieubedingungen
- C) Fluiddruck im Zusammenhang mit der Menge der vorhandenen Fluiden und deren Zusammensetzung; Spannungsumlagerungen und Anteil des Hohlraums- bzw. Schwäche-zonenverschlusses

- D) Betrachtung von Druck-, Zug- und Schubspannungen auch in den Bereichen der Schwächezonen
- E) Permeabilität und Durchlässigkeit für die einzelnen Bereiche des Verschlussystems (Auflockerungszone, Kontaktzone, geotechnische Konstruktion) unter Einbezug auftretender FEP-Einwirkungen (Kapitel 8.2.2)
- F) Ergebnisse der Prüfungen A bis D im Zusammenhang mit einem Lösungszutritt ins Grubengebäude und den dadurch veränderten FEP-Einwirkungen

4.) *Temperaturentwicklungsphase*: Temperaturabfall am Verschlussystem

Ablaufende Prozesse und Einwirkungen:

- A) Mit dem Ende der Wärmeproduktion erfolgt eine Abkühlung. Diese äußert sich in Form von Veränderungen des Spannungszustandes und des geochemischen Milieus.
- B) Mit dem Temperaturabfall erfolgt eine Abkühlung des Materials. Spannungsänderungen treten auf.
- C) Die Festigkeit könnte zu diesem Zeitpunkt durch die aus einem Temperaturabfall resultierenden erhöhten Ausfällungen wieder erhöht werden.
- D) Die Kontaktzone und andere Schwächezonen könnten in Folge der durch die Alteration hervorgerufenen veränderten Kontraktionsverhältnisse möglicherweise vergrößert werden.

Prüfung:

- A) Veränderung des geochemischen Milieus einschließlich möglicher Ausfällungen
- B) Zugspannungen infolge Kontraktion der Materialien und des umgebenden Salzgesteins unter Einbeziehung des vorangegangenen Festigkeitsverlustes, Änderung des Materialverhaltens durch Alteration
- C) Überprüfung, ob möglicherweise in diesem Zusammenhang durch die Kontraktion Hohlräumen oder Rissbildungen entstehen
- D) Permeabilität und Durchlässigkeit für die einzelnen Bereiche des Verschlussystems (Auflockerungszone, Kontaktzone, geotechnische Konstruktion) unter Einbezug auftretender FEP-Einwirkungen (Kapitel 8.2.2)
- E) Ergebnisse der Prüfungen A bis D im Zusammenhang mit einem Lösungszutritt ins Grubengebäude und den dadurch veränderten FEP-Einwirkungen

9 Aspekte der Vorbemessung am Beispiel eines Streckenverschlusses

Nachdem die ausschlaggebenden FEP für eine Vorbemessung identifiziert und durch ihren Abgleich mit den Prüfanforderungen an ein Abdichtungsbauwerk die zu prüfenden Eigenschaften an ein geotechnisches Verschlussbauwerk in einem Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle im Salz festgestellt wurden, werden in diesem Kapitel die Schritte der vereinfachten Methodel 1 (Kapitel 8.4) am Beispiel des in der VSG vorgestellten Konzepts für einen Streckenverschluss (Kapitel 4.1.2) dargelegt und auf ihre Durchführbarkeit hin untersucht. Im Rahmenkonzept ist diese Betrachtung dem Schritt 3 - Teilschritt Vorbemessung zuzuordnen, bei dem eine grundlegende Vorstellung über ablaufende Prozesse und deren Auswirkung auf die Funktion der geotechnischen Barriere geschaffen wird. Die dadurch erlangten Erkenntnisse stehen im Zusammenhang mit der Überprüfung bzw. Optimierung der Anforderungswerte und stellen die Grundlage der sich anschließenden Bemessung dar.

Die Methode 1 der Vorbemessung beinhaltet die Prüfung von drei aufeinander aufbauenden Vorbemessungsaspekten:

- Temperaturentwicklung am Streckenverschlussbauwerk
- Veränderung des geochemischen Milieus und Alteration des Bauwerks
- Spannungseinwirkungen unter veränderten Materialeigenschaften

Es erfolgt dabei eine konsekutive Betrachtung der einzelnen Vorbemessungsaspekte unter Einbezug vorangegangener Ergebnisse (teilgekoppelt). Die Basis bildet dabei eine Temperaturfeldberechnung unter Berücksichtigung der eingelagerten Abfälle. Aufbauend auf diesen Ergebnissen kann eine Untersuchung über die geochemische Milieuveränderung durchgeführt werden, um eine mögliche Verringerung von Festigkeit und Dichtigkeit (Permeabilitätserhöhung) des Bauwerks abzuleiten. Die Ergebnisse sind im Anschluss mit den prognostizierten, teilweise durch die Temperaturentwicklung beeinflussten, Spannungsänderungen zu vergleichen. Dabei wird überprüft, ob möglicherweise neu entwickelte Rissbildungen oder Auflockerungen zu einer Permeabilitätserhöhung führen. In diesem Zusammenhang werden die Anforderungswerte im Hinblick auf die Einhaltung der primären Sicherheitsfunktion optimiert.

Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln ausgeführt, sind die thermischen, chemischen und mechanischen Wechselwirkungen für die Ausprägung der FEP-Einwirkungen von großer Bedeutung. Salzgesteine zeigen zudem ein ausgeprägtes lineares Spannungs-, Temperatur- und zeitabhängiges Formänderungsverhalten. Dieses Materialverhalten verlangt eine enge Abstimmung zwischen den im gewählten Nachweiskonzept enthaltenen Stoffmodellen und den ermittelten Materialkennwerten. Bei Prognoseberechnungen bzw. bei der Beurteilung eines Verschlusssystems sollten daher nur standortbezogen mit den spezifischen Besonderheiten der jeweiligen Gebirgs- und Bauwerkssituation durchgeführt werden. Xie (2003) verdeutlicht, dass bei der Übersetzung des räumlichen Gebirgsausschnittes mit dem geotechnischen Verschlussystem in ein Berechnungsstrukturmodell insbesondere darauf zu achten ist, dass der betrachtete Ausschnitt groß genug ist, um die im Salzgebirge weitreichenden rheologischen Verformungseinflüsse richtig zu erfassen.

Während der Einfluss von Temperatur, Veränderung des geochemischen Milieus und der auftretenden Spannungen in Kapitel 7 und 8 in allgemeiner Weise dargestellt wird, beziehen sich die folgenden Ausführungen auf eine konkrete Anwendung anhand der aktuellen Daten und damit auf den derzeitigen Forschungsstand. Dabei wird davon ausgegangen, dass ein ausgehärtetes Bauwerk mit der vorgesehenen Materialzusammensetzung vorliegt.

9.1 Vorbemessungsaspekt: Temperaturentwicklung am Streckenschlussbauwerk

Temperaturveränderungen können sich in mehrfacher Hinsicht auf physikalische und chemische Prozesse auswirken (siehe Kapitel 8.2.1). Bei den Temperaturfeldberechnungen müssen Parameter wie z.B. der konstruktive Aufbau des Endlagers (Entfernung des Streckenverschlusses von der Wärmequelle und mögliche Temperaturfeldüberlagerungen), die Abfallart und deren einzulagernde Menge, die Konstruktion und Abschirmung der Abfallbehälter, die vorhandenen Lösungsvorkommen, das natürliche geothermische Temperaturfeld wie auch die geologischen Bedingungen (z.B. Gesteinszusammensetzungen sowie deren Wärmeleitfähigkeit und Ausdehnungskoeffizient) bekannt sein. Diese Parameter sind ausschlaggebend für die Bestimmung der Ankunftszeit und der maximalen Höhe der Temperatur sowie des Zeitpunkts des Temperaturabfalls am Streckenverschlussbauwerk. Die Ergebnisse aus den Untersuchungen zur Temperaturbetrachtung geben nicht nur Auskunft über die Zeitpunkte möglicher intensivierter oder abgeschwächter Einwirkungen, sondern sind auch grundlegend für die Berechnungen über die langzeitliche Veränderung des geochemischen Milieus.

Berechnung des Temperaturfeldes am Beispiel Gorleben

Zur Abschätzung der thermischen Belastung des Wirtsgesteins wurden im Rahmen der VSG Temperaturfeldberechnungen durchgeführt (BOLLINGERFEHR ET AL. 2012). Die thermischen Basisdaten beinhalten die Wärmeproduktion der Abfälle, das geothermische Temperaturfeld und die Beschreibung des thermischen Materialverhaltens. Den Berechnungen wird der speziell für Gorleben dimensionierten Endlageraufbau (Abb. 31) und das aktuelle Abfallmengengerüst zu Grunde gelegt. Die thermische Leistung wird dabei aus der Referenzleistung, der Gesamtanzahl der Brennelemente und deren Gesamtmasse an Schwermetallen bestimmt. Die Abfallbehälter und Kokillen sind mit einer Mischung von UO_2 - und MOX-Brennelementen versehen (bei Bohrlagerung bspw. ein Brennstoffmix von 89 % UO_2 und 11 % MOX). Der Grundspannungszustand des Gebirges wurde im Salzgestein und im Deckgebirge als lithostatisch isotrop mit einer Dichte von 2.200 kg/m^3 angesetzt, woraus sich für die Einlagerungssohle ein Grundspannungszustand von 18,8 MPa ergibt.

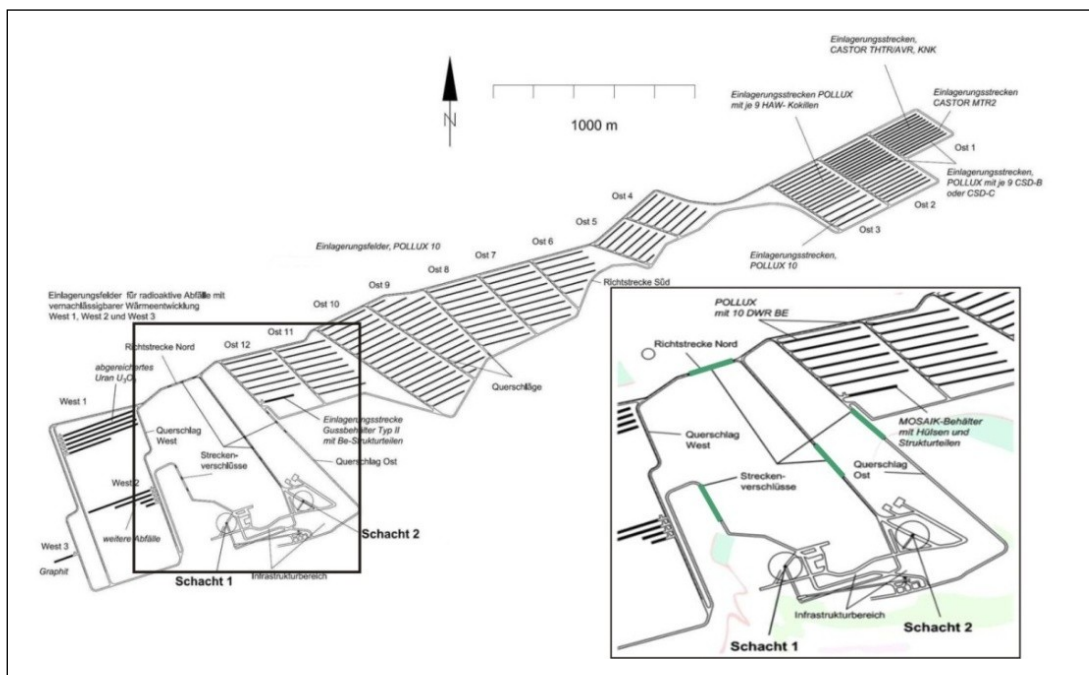


Abb. 31: Aufbau des Endlagers als Grundlage des Berechnungsmodells (nach BOLLINGERFEHR ET AL. 2012).

Neben der Art und der Menge des einzulagernden Abfalls sind auch die Kenntnisse über die geologischen Bedingungen von grundlegender Bedeutung. Unterschiedliche Gesteine besitzen auch unterschiedliche Eigenschaften, wie beispielsweise die thermische Leitfähigkeit und den Schmelzpunkt. Das Wirtsgestein in Gorleben besteht aus Halit (NaCl), Anhydrit (CaSO_4), Sylvit (KCl), Polyhalit ($\text{K}_2\text{MgCa}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), Carnallit ($\text{KMgCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$), Kieserit ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), Calcit (CaCO_3), MgCl_2 und Wasser (BORNEMANN ET AL. 2003). Im Allgemeinen wird diese Zusammensetzung auf das Hauptsalz Halit der Zechsteinserie mit den Nebengemengteilen Anhydrit und Polyhalit, einen carnallitischen Gesteinsbereich (Carnallit) und dem Hauptanhydrit vereinfacht. Die Grenztemperaturen für die Einlagerung richten sich u.a. nach der thermischen Stabilität der Gesteine und nach dem Temperaturfeld. Der Richtwert für die Einlagerung im Steinsalz liegt bei 200°C , um die chemische Integrität der Glasmatrix zu gewährleisten und eine mögliche chemische und mechanische Veränderung des Gesteins auszuschließen. Diese Temperaturgrenze liegt unterhalb der thermischen Stabilität von Polyhalit (230°C). In einer Entfernung von ca. 50 m zu den Richtstrecken ist mit carnallitischen Gesteinen zu rechnen (BOLLINGERFEHR ET AL. 2012). Die thermische Kristallwasserfreisetzung im Carnallit wird durch den im Intergranular- und Porenraum des Gesteins herrschenden Wasserdampfpartialdruck kontrolliert. Im unverritzten Gebirge (abgeschlossenes System, bei 1.000 m Teufe ca. 24 MPa) ist der Carnallit bis nahe dem Schmelzpunkt ($167,5^\circ\text{C}$) thermisch stabil, während er bei Atmosphärendrücken bereits bei ca. 80°C beginnt Kristallwasser abzugeben (HARTMUT & FRANKE 1986). Bei einer Gefügebrauflöcherung wird der intergranulare Wasserdampfpartialdruck kurzfristig herabgesetzt, so dass geringe Kristallwassermengen aus dem Carnallit-Gitter entweichen können (HARTMUT & FRANKE 1986). In den Berechnungen von BOLLINGERFEHR ET AL. (2012) wird von unbeeinflussten carnallitischen Gebirgsbereichen ausgegangen, bei denen der Schmelzpunkt des Carnallits zugrunde gelegt wird. Dieser liegt weit unterhalb des Schmelzpunktes des schwerlöslichen Hauptanhydrits und deckt diesen somit ab. Die thermische Auslegung ist daher im Einlagerungsbereich an 200°C und im Anschlussbereich an $167,5^\circ\text{C}$ gebunden. Unter Berücksichtigung des geothermischen Temperaturfeldes ($38,7^\circ\text{C}$) sind in BOLLINGERFEHR ET AL. (2012) somit Richtwerte (keine Bemessungswerte) für die thermische Entwicklung der einzulagernden Abfälle festgelegt, die die maximale Temperatur von ca. 140°C im Steinsalz (Einlagerungsbereich) und von ca. 127°C in einer Entfernung von 50 m vom Einlagerungsbereich begrenzen. Diese bilden die Grundlage der langzeitlichen Temperaturberechnungen.

Bei einer Temperaturfeldberechnung spielen auch Lösungsvorkommen und größere Hohlräume eine Rolle. Das Einlagerungskonzept sieht eine gestaffelte Einlagerung vor. Dies hat u.a. zur Folge, dass sich das Wirtsgestein durch die bereits eingelagerten Abfälle erwärmt und ausdehnt. Diese thermische Expansion des Gesteinskörpers zieht Zwangsspannungen mit sich, die zu einer erhöhten Streckenkonvergenz und damit möglicherweise zu einer schnelleren Kompaktion des Salzgruses führt. Mit einer beschleunigten Kompaktion steigt die Wärmeleitfähigkeit an. BOLLINGERFEHR ET AL. (2012) gehen anhand ihrer Berechnungsergebnisse davon aus, dass die thermisch geförderte Kompaktion des Salzgruses so weit fortgeschritten ist, dass innerhalb von 10 Jahren zumindest aus thermischer Sicht der Zustand von festem Steinsalz vorliegt.

Die Modellierungen von BOLLINGERFEHR ET AL. (2012) beziehen sich auf drei verschiedene Abfalleinlagerungsarten und wurden mit zwei verschiedenen Programmen (FLAC^{3D} und LinSour) für vier Modellkonstellationen: Einzelbehälter, Elementarzelle, endliche Feldbreite und Feld entsprechend der Endlagerauslegung durchgeführt.

Kammerlagerung: Einlagerung von Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung in horizontalen Einlagerungskammern,

Streckenlagerung: Einlagerung aller wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle in Endlagerbehältern mit Abschirmung in horizontalen Strecken (Pollux und Castor-Behälter),

Bohrlochlagerung: Einlagerung aller wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle in tiefen, vertikalen Bohrlöchern (Brennstabkokillen, Triple-Packs).

Da die Kammerlagerung nahezu keine thermische Einwirkung auf die Streckenverschlussbauwerke besitzt, wird sie in den folgenden Betrachtungen vernachlässigt. Die Ergebnisse der Temperaturfeldberechnungen bei einer Streckenlagerung als auch bei einer Bohrlochlagerung für das Berechnungsmodell „Endlagerauslegung“ sind in Abb. 32 und Abb. 33 dargestellt.

Bei der Berechnung des Temperaturfeldes bei der *Streckenlagerung* wurde der Einfluss der Salzgruskompektion um die Einlagerungsbehälter mit einbezogen. Diese Berechnung geht somit über eine rein thermische Berechnung hinaus, bei der die Salzgruskompektion unberücksichtigt bleibt. Der Temperaturverlauf an den einzelnen Standorten der Verschlussbauwerke ist in Abb. 32 dargestellt. Die Temperaturkurven zeigen den Verlauf der Temperatur an den jeweiligen Enden und den Mittelbereichen der einzelnen Streckenverschlüsse (Ost, West, Nord, Mitte). Aus der Graphik wird deutlich, dass im Bereich des Streckenverschlusses Ost die größte Temperaturveränderung auftritt, während die anderen Streckenverschlüsse einem geringeren Temperatureinfluss ausgesetzt werden. Die abweichenden Temperaturverläufe werden auf die unterschiedliche Nähe zu den Einlagerungsfeldern für wärmeentwickelnde Anfälle im Osten des Endlagers zurückgeführt. Um den materialspezifischen thermischen Anforderungswert für die Auslegung der Verschlussbauwerke einheitlich festzulegen, ist der Temperaturverlauf mit der höchsten Temperatur (mittlerer Bereich des Streckenverschlusses Ost) ausschlaggebend. Die Berechnungsergebnisse von BOLLINGERFEHR ET AL. (2012) zeigen, dass in den ersten 50 Jahren nach Einlagerungsbeginn keine Temperaturveränderung in diesem Bereich stattfinden wird. Nach 50 Jahren folgt allerdings ein relativ sprunghafter Anstieg der Temperatur, bis nach ca. 500 Jahren die maximale Temperatur von ca. 58 °C erreicht wird. Die Maximaltemperatur hält circa weitere 250 Jahre an. Im Anschluss fällt die Temperaturkurve langsam ab, bis in diesem Bereich nach 3.000 Jahren Temperaturen um die 50 °C, nach 4.000 Jahren ca. 48 °C vorliegen dürften (Abb. 32 / Tab. 5).

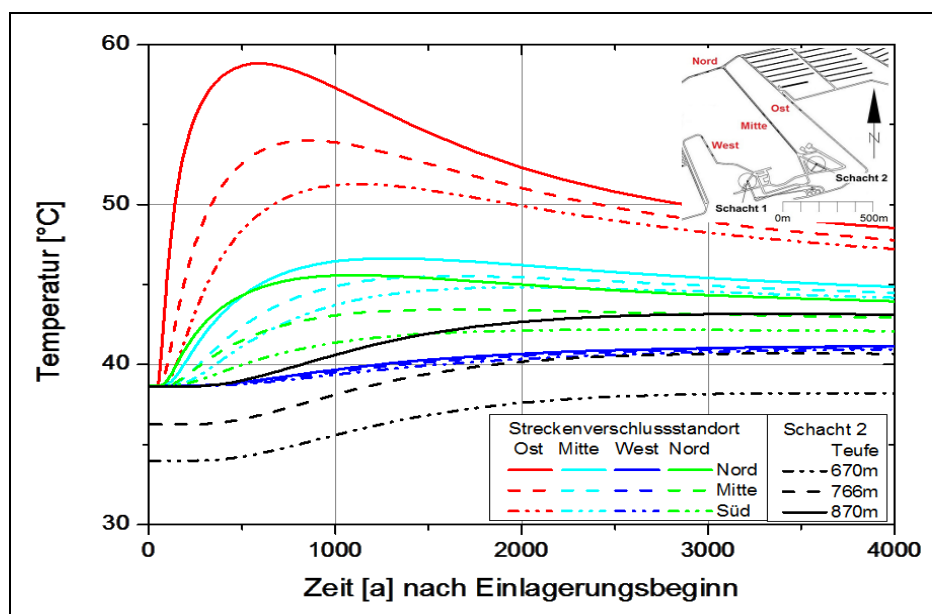


Abb. 32: Zeitlicher Temperaturverlauf bei einer Streckenlagerung an den Streckenverschlussbauwerken im Berechnungsmodell Endlagerauslegung (Bollingerfehr et al. 2012).

In den Betrachtungen der VSG wurde zur Unterstützung einer möglichen Rückholung der Abfälle eine Verrohrung der Einlagerungsbohrlöcher vorgeschlagen. Aufgrund dieser Verrohrung wurde für die *Bohrlochlagerung* eine rein thermische Berechnung durchgeführt und somit der thermische Einfluss des Versatzes ausgeschlossen. Der zeitliche Verlauf der Temperatur an den Streckenverschlussbauwerken ist in Abb. 33 und Tab. 5 dargestellt. Wie auch bei der Streckenlagerung zeigt sich erwartungsgemäß die größte Temperaturveränderung beim Streckenverschlussbauwerk Ost. Die Temperatur steigt dort zunächst relativ langsam an und liegt innerhalb der ersten 100 Jahre nach Einlagerungsbeginn unterhalb von ca. 45 °C. Dem schließt sich ein steiler Anstieg der Temperaturkurve an, bis nach ca. 750 Jahren der thermische Maximalwert von 72 °C am Streckenverschlussbauwerk erreicht ist. Die Temperatur liegt ca. 450 Jahre nach Erreichen der Maximaltemperatur noch über 70 °C bevor sie langsam abklingt und nach ca. 4.000 Jahren einen Wert von ca. 57 °C erreicht hat.

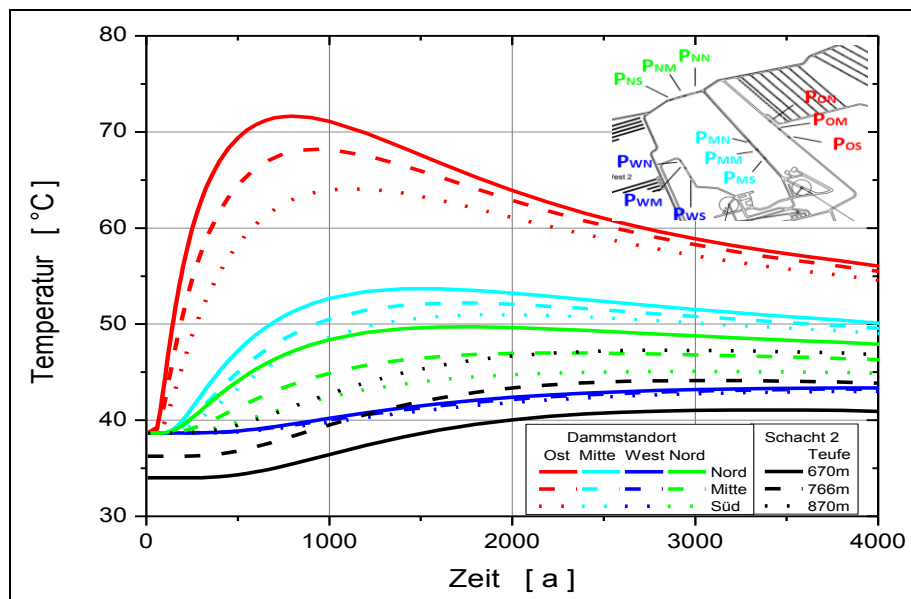


Abb. 33: Zeitlicher Temperaturverlauf bei einer Bohrlochlagerung an den Streckenverschlussbauwerken im Berechnungsmodell Endlagerauslegung (BOLLINGERFEHR ET AL. 2012);
P=Streckenverschluss, W=West, N=Nord, O=Ost, S=Süd, M=Mitte.

Ein Vergleich der Berechnungswerte der Maximaltemperatur der Berechnungsmodelle für eine Streckenlagerung und eine Bohrlochlagerung zeigt, dass der Maximaltemperaturwert bei der Bohrlochlagerung gegenüber der Streckenlagerung später eintritt, ca. 15 °C höher ist und generell höhere Temperaturen während des Berechnungszeitraumes ermittelt wurden. Diese Tatsache zeigt den Einfluss des Endlagerkonzeptes auf die Auslegung geotechnischer Verschlussbauwerke. In der Vorbemessung ist zu prüfen, inwieweit unterschiedliche Temperaturen Unterschiede im geochemischen Milieu und damit der Widerstandskraft sowie hinsichtlich der Spannungseinwirkungen bewirken und ob sich Änderungen hinsichtlich der Materialparameter ergeben.

Tab. 5: Vergleich der zeitbezogenen Temperaturentwicklungen am Streckenverschlussbauwerk Ost für die Strecken- und Bohrlochlagerung im Berechnungsmodell Endlagerauslegung, abgeleitete Näherungswerte aus den Abb. 33 und 34, Maximaltemperaturen sind grau unterlegt.
Daten aus BOLLINGERFEHR ET AL. (2012).

Zeit (Jahre)	Temperatur (Näherungswerte in °C)	
	Streckenlagerung	Bohrlochlagerung
0	38,0	38,0
50	38,5	39,0
100	43,0	46,0

Zeit (Jahre)	Temperatur (Näherungswerte in °C)	
	Streckenlagerung	Bohrlochlagerung
150	50,0	52,0
200	53,5	56,0
250	55,0	60,0
350	57,5	65,0
400	58,0	67,5
450	58,8	68,0
500	59,0	69,5
600	58,8	71,0
750	58,0	72,0
1000	57,5	71,0
2000	52,5	64,0
3000	50,0	58,5
4000	48,0	56,5

Wird bei einer Vorbemessung eines geotechnischen Streckenverschlussbauwerkes das Modell 1 (Kapitel 8.4.) verwendet, ergibt sich folgende Zuordnung der Zeitpunkte (Tab. 6):

- t1: Die Wärmeentwicklung im Nahfeld des Einlagerungsbereiches beginnt bei beiden Einlagerungsvarianten nach ca. 25 Jahren. Da am Bauwerk keine Temperaturveränderungen auftreten, müssen mögliche Spannungsänderungen im Wirtsgestein einkalkuliert werden, die aus der Temperaturentwicklung im Einlagerungsbereich resultieren.
- t2: Erste messbare Temperaturänderungen am Verschlussbauwerk treten bei der Streckenlagerung nach ca. 50 Jahren auf. Bei der Bohrlochlagerung ist die Temperatur nach 50 Jahren bereits um ein Grad gestiegen. Der Zeitpunkt der Temperaturerhöhung bei der Bohrlochlagerung wird auf ca. 40 Jahre geschätzt. Zu dieser Zeit kann neben Spannungsänderungen auch von einer möglichen Veränderung des geochemischen Milieus ausgegangen werden.
- t3: Die maximale Temperatur am betrachteten Streckenverschluss tritt bei der Streckenlagerung nach ca. 500 Jahren, bei der Bohrlochlagerung nach ca. 750 Jahren ein. Das Temperaturmaximum bleibt bei beiden Einlagerungsvarianten mindestens weitere 250 Jahre bestehen. In diesem Zeitrahmen kann von der maximalen Beeinflussung der Widerstandskraft ausgegangen werden.
- t4: Durch die zeitliche Begrenzung der Modellierungsergebnisse auf 4.000 Jahre kann der Zeitpunkt, an dem sich die ursprünglichen Temperaturbedingungen in der Umgebung des Bauwerks wieder einstellen, nicht abgeleitet werden. Da bei der Streckenlagerung die Temperatur am Ende der Berechnungen bereits einen relativ flachen Verlauf aufweist, wird an dieser Stelle eine Schätzung über einen möglichen Zeitpunkt durchgeführt. Unter der Voraussetzung eines kontinuierlichen Temperaturabfalls könnte frühestens nach 13.000-15.000 Jahren annähernd die ursprüngliche Gebirgstemperatur erreicht sein. Bei der Bohrlochlagerung ist eine solche Abschätzung an dieser Stelle nicht durchführbar, da der Kurvenverlauf nach 4.000 Jahren noch zu steil ausgebildet ist.

Tab. 6: Näherungswerte der Zeitpunkte und der Temperatur am Streckenverschluss Ost, Daten aus Abb. 33 und 34 abgeleitet. *derzeit nicht festlegbar

	Zeitpunkte (in Jahren)		Temperatur am Streckenverschluss (°C)	
	Streckenlagerung	Bohrlochlagerung	Streckenlagerung	Bohrlochlagerung
t1	25	25	38	38
t2	50	40	>38	>38
t3	500	750	59	72
t4	(>13.000)	*	38	38

Die in der Tab. 6 dargestellten Werte können nur als Näherungswerte betrachtet werden. Die im Zuge einer Modellierung entstandenen Vereinfachungen im Modellaufbau und in den Berechnungsansätzen sollten durch die Wahl eines geeigneten Sicherheitszuschlags sowohl auf die Zeitpunkte als auch auf die Temperaturen berücksichtigt werden. Der Sicherheitszuschlag kann auf der Basis einer Unsicherheitsanalyse bestimmt werden. Mit Hilfe eines solchen Vorgehens können die thermischen Materialgrenzwerte festgelegt werden. Bezogen auf den Eurocode würde dieser Wert dann dem repräsentativen Wert der Einwirkung Temperaturveränderung entsprechen, der Grundlage für den zu berechnenden Bemessungswert ist (siehe Kapitel 4.2.2 und Kapitel 10).

9.2 Vorbemessungsaspekt: Veränderung des geochemischen Milieus und Alteration des Bauwerks

Im zweiten Schritt der Methode 1 zur Vorbemessung wird die Widerstandsfähigkeit der geotechnischen Barriere betrachtet. Dabei wird sich hauptsächlich auf das Ausmaß und den zeitlichen Verlauf der Alteration des Bauwerks bezogen und setzt damit die Kenntnis über geochemische Vorgänge und deren Auswirkungen auf die in einem Endlager vorkommenden Gesteins- und Bauwerksmaterialien voraus. Die Zusammensetzung der eingebrachten Baustoffe und der angreifenden Lösungen sind ausschlaggebend für den Korrosionsverlauf. Eine entscheidende Rolle für den Schadensverlauf spielen sowohl die Porengrößenverteilung im Baustoff als auch die als Transport- und Reaktionsmedium fungierenden Lösungen, die je nach Transportvorgang (Kapillarer Sog, Permeation, Diffusion, Osmose) die Geschwindigkeiten und Mengen der Auflösungen bzw. Umlösungen steuern (THIENEL 2008). Auflösungen und Umlösungen führen zu Porositäts- und Permeabilitätsveränderungen, aus denen eine Abnahme der Dichtigkeit und ggf. auch der Tragfähigkeit folgen könnte.

Um eine Aussage über die Widerstandsfähigkeit eines Verschlussbauwerks über lange Zeiträume tätigen zu können, sind neben der Kenntnis über die Festkörper- und Lösungsgleichgewichte, Redoxreaktionen, Komplexbildungen, Sorptionsprozesse und die Wechselwirkungen in Lösungen bzw. von Lösungen und Bauwerksmineralien auch das Verständnis der Thermodynamik und Kinetik von großer Bedeutung (SEHER & BRACKE 2012). Die Ergebnisse des Vorbemessungsaspektes der Temperaturveränderungen am Bauwerk werden in Bezug auf die Reaktionsgeschwindigkeit hinzugezogen. Die Betrachtungen in diesem Kapitel beziehen sich auf den Baustoff Sorelbeton, der in den in der VSG dargestellten Streckenverschlussplanungen vorgesehen ist (siehe Kapitel 4.1).

9.2.1 Sorelbeton in trockenen Milieu

Der Sorelbeton, auch bekannt unter den Namen Sorelzement, Magnesiazement bzw. -beton, MgO-Zement bzw. -Beton, Magnesitzement bzw. -beton oder Magnesiumoxychloridzement bzw. -beton, ist ein kieselsäurefreies Bindemittelsystem auf $\text{MgO-MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$ Basis und gehört damit zu den Magnesiumbindemittelsystemen (PRIESTEL ET AL. 2007). Die Uneinheitlichkeit bei der Namensgebung könnte auf Unsicherheiten bei der Definition zurückzuführen sein. Im Allgemeinen besteht ein Beton aus einem Gemisch aus Zement, Zuschlägen (z.B. Kies, Sand) und Wasser (Anmachlösung), wobei weitere Zusatzstoffe und Zusatzmittel enthalten sein können. Der ursprüngliche Sorelbeton besteht aus den Ausgangsstoffen Magnesiumoxid (MgO , Periklas) und einer Magnesiumchloridlösung (MgCl_2 , Anmachlösung). Nach dieser Definition ist der Sorelbeton kein Beton im eigentlichen Sinn, da bei der Baustoffmischung auf den Bestandteil Zement und die Zuschlagsstoffe verzichtet werden. Für die untertägige Anwendung wird die ursprüngliche Zusammensetzung des Sorelbeton um den Zuschlagsstoff Salzgrus (NaCl) erweitert, um sich an die Gesteinseigenschaften des angrenzenden Gesteins (Steinsalz) anzunähern und damit einheitlichere Bedingungen zu schaffen. Die aus dem Reaktionsprozess von Magnesiumoxid und der Magnesiumchloridlösung hervorgehenden Oxichloride ($x\text{MgO}\cdot x\text{MgCl}_2\cdot x\text{H}_2\text{O}$) fungieren, wie der Zement im Beton, als Bindemittel. Da im Bergbaubereich außerdem ein Zuschlagsstoff (Salzgrus) zugesetzt wird, ähnelt die Zusammensetzung nun einem Beton.

Der ursprüngliche Sorelbeton wird in der Bauindustrie aufgrund seiner hohen Haftfähigkeiten, des geringen Schwindens, dem niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizient als auch wegen der hohen Festigkeiten geschätzt (PRIESTEL ET AL. 2007 / MISRA & MATHUR 2007 / XIA ET AL. 1991). Im Vergleich zu den Bindemittelsystemen auf Basis von Portlandzementen zeigt sich, je nach Mischungsverhältnis des Sorelbetons, ein höheres Elastizitätsmodul, wodurch höhere Druck- und Biegefestigkeiten gewährleistet werden (MISRA & MATHUR 2007 / XIA ET AL. 1991). Die positiven Eigenschaften sollen auch im Untertagebereich zur Geltung kommen. Zusätzlicher Vorteil ist im Gegensatz zu zementgebundenen Baustoffen die lange Fließfähigkeit des Baustoffs (TEICHMANN & MEYER 2009). Dadurch ist nach dem Anmischen ein Transport über größere Strecken möglich, wodurch die Möglichkeit besteht, den Standort der Mischanlage weniger häufig wechseln zu müssen.

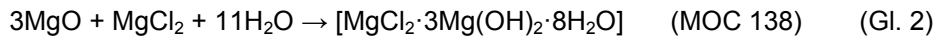
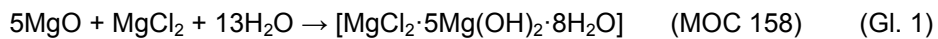
Magnesiumbindersysteme erhalten ihre Festigkeit durch die Ausbildung basischer Salze in Form von Oxichloriden ($\text{Mg}_2(\text{OH})_3\text{Cl}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$), Oxisulfaten ($\text{MgSO}_4\cdot 5\text{Mg}(\text{OH})_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$) oder Oxiphosphaten ($\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$) (KRAUKE & FLIß 2008). Die Oxisulfat- und Oxiphosphatsysteme befinden sich noch in der Erprobungs- und Entwicklungsphase (KRAUKE & FLIß 2008). Derzeit eingesetzt werden Baustoffe mit einem Bindemittelsystem auf Oxichlorid-Basis. Die Standardrezeptur im Untertagebereich besteht aus einem MgO -Pulver (Bindemittel), dem Zuschlagstoff Steinsalz (NaCl) und einer MgCl_2 -reichen Lösung (TEICHMANN & MEYER 2009 / SEHER & BRACKE 2012). Mitunter werden weitere Zuschlagsstoffe, wie Flugasche, Quarzsand, Anhydrid oder Zusätze, wie Gesteinsmehl, Tone oder spezielle Fließmittel zur Einstellung der rheologischen Eigenschaften hinzugefügt (KRAUKE & FLIß 2008 / SEHER & BRACKE 2012).

In einem Magnesiumbindersystem wird reaktives MgO durch die MgCl_2 -Lösung gelöst und in ein Gel umgewandelt. Dieses kristallisiert neben dem langsamer reagierenden unaktiven MgO und der für die Reaktion nicht benötigte Menge an MgCl_2 -Lösung langsam aus (SORRELL & ARMSTRONG 1976 / SEHER & BRACKE 2012 / DENG & ZHANG 1999). Die Reaktionsraten sind stark von der Reaktivität des MgO -Pulvers, der Konzentration der MgCl_2 -Lösung, dem molaren Verhältnis zwischen dem reaktiven MgO und der MgCl_2 -Lösung als auch von der Temperatur abhängig (MISRA & MATHUR 2007 / NØRLUND CHRISTENSEN ET AL. 1995 / BA & GUAN 2009). Untersuchungen von BA & GUAN (2009) zeigen, dass ein alkalischer pH-Wert (ab pH 9) die Hydrationsprodukte stabilisiert.

Im Oxichloridsystem bestehen die Hauptreaktionsprodukte aus kristallinen Stoffen, die in der Strukturformel durch ihre Stoffmenge an $\text{Mg}(\text{OH})_2$ in Bezug auf die Stoffmenge an MgCl_2 gekennzeichnet werden (Seher & Bracke 2012). Darauf aufbauend können die Magnesiumchloridverbindungen verschiedener Zusammensetzung in vier verschiedene Phasen unterteilt werden (DENG & ZHANG 1999 / MISRA & MATHUR 2007 / XIA ET AL. 1991 / SORRELL & ARMSTRONG 1976 / DINNEBIER ET AL. 2010):

- 3-1-8 Phase: $3\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
- 5-1-8 Phase: $5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
- 2-1-4 Phase: $2\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
- 9-1-4 Phase: $9\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ¹⁶

Die 2-1-4 und die 9-1-4 Phase existieren erst oberhalb von 80 °C (DINNEBIER ET AL. 2010) bzw. 100 °C (CHAU & LI 2008) und werden bei der Abkühlung in die 3-1-8 Phase überführt (DINNEBIER ET AL. 2010 / CHAU & LI 2008). Experimentelle Untersuchungen der Temperaturentwicklung während des Abbindeprozesses belegen Temperaturerhöhungen bis 85 °C (TEICHMANN & MEYER 2009). Im Zusammenhang mit der Starttemperatur von ca. 34 °C kann somit eine Endtemperatur von 119 °C erreicht werden (TEICHMANN & MEYER 2009). Aufgrund dieser Daten besteht während des Abbindeprozesses die Möglichkeit zur Bildung der 2-1-4 oder 9-1-4 Phase. Für die Betrachtungen zur Langzeitsicherheit in der Nachbetriebsphase gilt der Abkühlungsprozess als abgeschlossen. Eine Stabilität der 2-1-4 oder 9-1-4 Phase ist aufgrund der prognostizierten Temperaturen durch die eingelagerten radioaktiven Abfälle am hier verfolgten Beispielbauwerk nicht zu erwarten (siehe Kapitel 9.1). Deshalb bleiben die 2-1-4 und 9-1-4 Phase in den weiteren Betrachtungen unbeachtet. Die relevanten Phasen 3-1-8 (MOC 138) und 5-1-8 (MOC 158) können durch folgende Reaktionen dargestellt werden (BILINSKI ET AL. 1984):



Bei Nichteinstellung des stöchiometrischen Verhältnisses entsprechend der Reaktionsgleichungen können neben dem Oxichloriden der Phase 3-1-8 und 5-1-8 weitere Phasen vorkommen.

Bei der technischen Umsetzung der angestrebten Rezepturen können durch geringe Abweichungen der Massenverhältnisse von $\text{MgO}/\text{Anmachflüssigkeit}$ entweder reliktischer Periklas oder zusätzlicher Brucit auftreten. Beim Abbinden entsteht als erstes Reaktionsprodukt die metastabile 5-1-8 Phase, die sich in die thermodynamisch stabile 3-1-8 Phase umwandelt (MAŽURANIĆ ET AL. 1982 / BA & GUAN 2009 / SEHER & BRACKE 2012 / KRAUKE & FLIß 2008). BA & GUAN (2009) gehen davon aus, dass die freie Reaktionsenergie allerdings so klein ist, dass die Reaktion annähernd umkehrbar ist, so dass sich die 3-1-8 Phase bei einer Änderung der Reaktionsbedingungen auch in die 5-1-8 Phase umwandeln kann. Welche der Phasen nach dem Abbinden vorliegt, hängt vom MgO/MgCl_2 -Verhältnis ab. Liegt das Verhältnis oberhalb von 5, dominiert die 5-1-8 Phase (BA & GUAN 2009). Ist das Verhältnis $\text{MgO}/\text{MgCl}_2 < 5$, liegt die 3-1-8 Phase vor (BA & GUAN 2009). Die Phasenreaktion (Abbindezeit) lässt sich über die Reaktivität des verwendeten Magnesiabinders und über die Konzentration der Lösung steuern (SEHER & BRACKE 2012 / KRAUKE & FLIß 2008). Höheren Konzentrationen von MgCl_2 -Lösung führen zu einer schnelleren Reaktionsgeschwindigkeit bzw. Umwandlungsrate (MAŽURANIĆ ET AL. 1982). Die Art der Phase und deren Stabilität

¹⁶ In der Literatur lässt sich die 9-1-4 Phase auch mit der Bezeichnung 9-1-5 Phase (CHAU & LI 2008) oder 9-1-6 und 9-1-8 Phase finden (XIA ET AL. 1991). Die Bezeichnung 9-1-4 Phase bezieht sich auf die Untersuchungen von DINNEBIER (2010), in denen vier Wasserstoffmoleküle in der Kristallstruktur nachgewiesen worden sind. Generell zeigt sich nach Abkühlung eine langsame Überführung in 3-1-8 Phase.

bestimmen die strukturelle Widerstandsfähigkeit des erhärteten Baustoffs (NØRLUND CHRISTENSEN ET AL. 1995 / CHAU & LI 2008 / XIA ET AL. 1991).

In den Betrachtungen der VSG ist für die Streckenverschlüsse ein auf Sorelzement basierender Baustoff mit der Rezeptur A1 vorgesehen. Diese Rezeptur wurde im Rahmen der Forschungs- und Entwicklungsphasen für Strömungsbarrieren für das Asse-Bergwerk entwickelt. Der Sorelbeton mit der Zusammensetzung A1 besteht aus 11,3 % Periklas (MgO) (entspricht 11 Gew% der Sorelsuspension), 63,7 % Steinsalzgrus (entspricht 64 Gew% der Sorelsuspension) und 25,0 % Magnesiumchlorid-Lösung (entspricht 25 Gew% der Sorelsuspension) (METZ ET AL. 2006 A/ WOLF ET AL. 2012 / TEICHMANN & MEYER 2009). Anhand von Messungen an einem Versuchsbauwerk dieser Zusammensetzung wurde eine Gesamtporosität des verdichteten Baustoffs von 17,9 Vol.-% \pm 0,9 Vol.-% festgestellt (TEICHMANN & MEYER 2009). Die Ergebnisse von TEICHMANN & MEYER (2009) zeigten, dass die Poren nur teilweise Gas gesättigt waren, wodurch sich effektive Gas- und Lösungsporenspezifitäten mit Mittelwerten von rund $4,5 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ bzw. 10^{-19} ergaben. Im Allgemeinen wird eine schnelle Bildung der als thermisch stabil angesehenen 3-1-8 Sorelphase angestrebt. Maßgeblich für die Festigkeitsentwicklung des Sorelbetons der Phase 3-1-8 ist die Bildung eines Netzwerkes aus nadelförmigen Mg-Oxichloridkristallen. Die experimentell nachgewiesene Dichte einer reinen 3-1-8 Phase liegt bei 1.859 kg/m^3 (rechnerisch 1.858 kg/m^3), während die Dichte der reinen 5-1-8 Phase 1.888 kg/m^3 (rechnerisch 1.925 kg/m^3) beträgt (XIA ET AL. 1991). Die für die Endlagerung spezifizierten Sorelbetone variieren in der Dichte von 1.940 kg/m^3 bis 2.170 kg/m^3 (TEICHMANN & MEYER 2009 / KRAUKE & FLIß 2008). Für den Sorelbeton in Gorleben geben MÜLLER HOEPPE ET AL. (2012B) eine Dichte von 1.855 kg/m^3 an.

Im trockenen Milieu deuten die Eigenschaften des Baustoffs Sorelbeton auf eine vielversprechende Anwendung hin. Wegen der geringen Beständigkeit gegenüber Süßwasser und magnesiumarmen Salzlösungen verlangt die Anwendung dieses Baustoffmaterials für ein Verschlussbauwerk im Untertagebereich eine eingehende Überprüfung (PRIESTEL 2007 / MISRA & MATHUR 2007 / XIA ET AL. 1991 / SORRELL & ARMSTRONG 1976).

9.2.2 Sorelbeton im Kontakt mit salinaren Lösungen

Trifft eine Lösung auf einen Festkörper, können chemische Prozesse ablaufen. Dabei ist die Konzentration der Reaktionspartner ausschlaggebend. Liegt kein chemisches Gleichgewicht zwischen dem Festkörper und der Lösung vor, setzen Phasenreaktionen in Form von Auflösungs- oder Ausfällungsreaktionen ein, bis sich ein Gleichgewicht und damit stabile Verhältnisse eingestellt haben. Bereits geringe Veränderungen der Lösungszusammensetzung können somit Auflösungs- oder Ausfällungsreaktionen hervorrufen.

In einem Salzvorkommen können grundsätzlich interne salinare Lösungen auftreten, die sich in ihrer Bandbreite zwischen:

- A) MgCl_2 -dominierte Lösungen, z.B. „R“ oder „Q“-Lösungen gemäß der Nomenklatur nach JÄNECKE (1923) bzw. „IP19“ oder „IP21“ nach USDOWSKI & DIETZEL (1998) und
- B) NaCl -dominierte Lösungen mit geringen Mg-Gehalten

erfassen lassen.

Bei der Auslegung eines untertägigen Streckenverschlussbauwerks muss die Möglichkeit eines Schachtverschlussversagens in Betracht gezogen werden (Kapitel 2). Daher können neben den salzstockinternen auch salzstockexterne Lösungen im Grubengebäude auftreten. Salzstockexterne

Lösungen sind NaCl-dominierte Lösungen deren wässrige Komponente entweder aus den oberen Grundwasserstockwerken (Deckgebirgswässer, Süßwasser bis schwach salinare Wässer, geringer NaCl- und Mg-Gehalt), aus den unteren Grundwasserstockwerken (Deckgebirgswässer, Süßwasser mit der Tiefe ansteigende Salinität) oder aus dem Bereich des Hutgesteins (gesättigte NaCl-Lösung) stammen (MÜLLER-HOEPPE ET AL. 2012A).

Eine Einschätzung der Widerstandskraft eines Streckenverschlussbauwerks erfordert sowohl Kenntnisse über die chemischen Reaktionen salzstockinterner und -externer Lösungen in Kontakt mit dem Sorelbeton (hier Sorelbetonmischung A1), als auch über das Ausmaß und den zeitlichen Verlauf des Korrosionsfortschrittes im Bauwerk. Nach derzeitiger Kenntnis ist der Sorelbeton im Kontakt mit Mg-gesättigten Lösungen beständig (KRAUKE & FLIß 2008 / NIEMEYER ET AL. 2009 / MÜLLER-HOEPPE ET AL. 2012A). Treffen Lösungen mit geringen MgCl_2 -Gehalten auf den Baustoff, kommt es zur Auflösung und Auswaschung (Freisetzung) der in den Hydraten der 3-1-8 und 5-1-8 Phase enthaltenen Mg^{2+} -, OH^- - und Cl^- -Ionen (SEHER & BRACKE 2012 / BA & GUAN 2009). Die Mg-Oxichlorid-Phasen reagieren dabei zu Brucit ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), wodurch die Stabilität des Betons beeinträchtigt und dessen Porosität und Permeabilität erhöht wird (BECKER ET AL. 2009 / SEHER & BRACKE 2012 / KRAUKE & FLIß 2008). Über die Zusammensetzung von angreifenden Lösungen, die keine Zersetzung der für die Festigkeit des Bauwerks maßgeblichen Hydrate hervorrufen, finden sich in der Literatur nur sehr wenig konkrete Aussagen. KRAUKE & FLIß (2008) beschreiben eine Einstufung der Magnesiumbindersysteme auf Oxichloridbasis als langzeitstabil, wenn der MgCl_2 -Gehalt der angreifenden Lösung $\geq 50 \text{ g MgCl}_2/\text{kg H}_2\text{O}$ ($0,5 \text{ mol/kg H}_2\text{O}$) beträgt. Liegt der MgCl_2 -Gehalt der Lösung darunter, tritt eine Korrosion des Bindersystems ein. Nach Meinung von DINNEBIER ET AL. (2010) liegt eine thermodynamische Stabilität der 3-1-8 Phase des Mg-Oxichlorid-systems in Kontakt mit MgCl_2 -Lösung vor, wenn diese eine Konzentration von über $70 \text{ g MgCl}_2/\text{kg H}_2\text{O}$ ($> 1 \text{ mol/kg H}_2\text{O}$) besitzt. In Gegenwart einer geringeren Konzentration ($< \text{ca. } 1 \text{ mol MgCl}_2/\text{kg H}_2\text{O}$) zerfallen die Oxichloride unter Bildung von Brucit. DINNEBIER ET AL. (2010) weisen aber auch darauf hin, dass Daten vorliegen, in denen Brucit im metastabilen Bereich bis etwa $4 \text{ mol MgCl}_2/\text{kg H}_2\text{O}$ mit einer höheren Löslichkeit als für die stabile Phase 3-1-8 auftritt. BECKER ET AL. (2009) erklären, dass bei einer 12,2 %igen Mg-Konzentration einer NaCl-Lösung ($122 \text{ g MgCl}_2/\text{kg H}_2\text{O}$) die Gleichgewichtskonzentration zwischen der 3-1-8 Phase und der auftretenden Lösung eintritt und oberhalb dieser Konzentration keine Umlösung des Magnesiumbetons (mit Zuschlagsstoffen) erfolgt. Ergebnisse experimenteller Untermauerungen der verschiedenen vorstehenden Aussagen zu numerisch ermittelten Gleichgewichtskonzentrationen sind in der öffentlich zugänglichen Literatur allerdings kaum zu finden.

Am Institut für Endlagerforschung der TU-Clausthal (SCHIRMER ET AL. 2013) wurde der Fragestellung nach dem Verlauf von chemischen Prozessen zwischen Sorelbeton und Lösungen unterschiedlicher Zusammensetzung nachgegangen. Die Untersuchungen beschreiben mit Hilfe von thermodynamischen Berechnungen¹⁷ und Experimenten¹⁸ die ablaufenden chemischen Reaktionen an ausgehärteten Sorelbetonen mit dominierender 3-1-8 und 5-1-8 Phase im Kontakt mit einer MgCl_2 dominierten Lösung (nahe R-Lösung), einer NaCl dominierten Lösung mit geringem Magnesiumanteil (0,9 Gw.%) und einer NaCl gesättigten Lösung in einem geschlossenes System. Die Sorelbetonrezepturen enthalten neben den Oxichlorid-Phasen Halit sowie geringe Mengen an restlichen Periklas (MgO) in der 3-1-8 dominierten Variante und Brucit ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) in der

¹⁷ Die Berechnungen der Fest-Flüssig-Reaktionen wurden mit den Programmen EQ3NR und EQ3/6 durchgeführt. Ermittelt wurden die auftretenden Reaktionsprozesse von zwei Sorelbetonrezepturen (3-1-8 und 5-1-8 dominierend) im Kontakt mit drei unterschiedlichen Lösungen (reine NaCl-Lösung, NaCl-Lösung mit geringem Mg-Gehalt, R-Lösung).

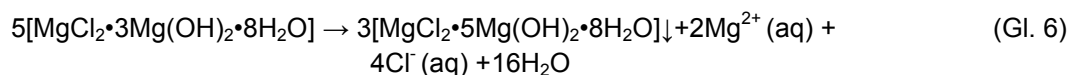
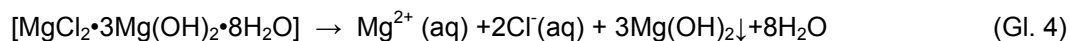
¹⁸ Die Experimente wurden mit den Sorelbetonen (dominierende 3-1-8 und 5-1-8 Phase) und Lösungen (NaCl-, NaCl- mit Zusatz von Mg^{2+} , R-Lösung) über einen Zeitraum von 360 Tagen durchgeführt. Die Ergebnisse beruhen auf der Analyse der verwendeten Lösungen mit Hilfe der Ionenchromatographie und der Untersuchung der Feststoffe unter Anwendung der Pulver-Röntgendiffraktometrie und der Elektronenstrahlmikrosonde.

5-1-8 dominierten Variante. Nebenbestandteile wie Forsterit, Magnesit, Kalzit und Quarz werden für den Reaktionsverlauf nicht betrachtet. Die Ergebnisse zeigen, abhängig von der Art des Sorelbetons und der jeweiligen Lösung, ein unterschiedliches Reaktionsverhalten. Da der Sorelbeton (3-1-8 Phase) in seiner Zusammensetzung der geplanten Rezeptur für die in der VSG betrachteten Streckenverschlussbauwerke ähnelt (z.B. im prozentualen Anteil des NaCl-Zuschlags) und die Lösungen den oben beschriebenen salzinternen und salzexternen Lösung entsprechen, werden die Ergebnisse von SCHIRMER ET AL. (2013) im Folgenden herangezogen, um die chemische Stabilität von Sorelbeton mit dominierender 3-1-8 Phase (Verschlussbauwerk) in Kontakt mit möglich auftretenden Lösungen (Lösungszutritt) darzustellen.

Sorelbeton mit dominierender 3-1-8 Phase in Kontakt mit reiner NaCl-Lösung (Mg-freies System)

In Kontakt mit einer reinen NaCl gesättigten Lösung zeigen die im Folgenden beschriebenen Ergebnisse von SCHIRMER ET AL. (2013) am Ende des Reaktionsverlaufes einen vollständigen Verlust der Oxichloride der 3-1-8 Phase und ein alleiniges Vorliegen von Oxichloriden der Phase 5-1-8 (Abb. 34).

Im Verlauf der Reaktion wird zuerst der restliche Periklas (MgO) des Sorelbetons vollständig umgesetzt, wobei sich Brucit ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) bildet (Gl. 3). Die Oxichloride der Phase 3-1-8 beginnen sich im Kontakt mit der Lösung zu zersetzen. Dabei fällt weiterer Brucit aus und Mg^{2+} - und Cl^- -Ionen werden an die Lösung abgegeben (Gl. 4). Gleichzeitig nimmt der Na^+ -Gehalt in der Lösung ab. Dies lässt den Schluss auf eine Übersättigung der Lösung an NaCl zu, wodurch Steinsalz (NaCl) ausgefällt wird. Der pH-Wert der Lösung steigt zu Beginn der Reaktionen von ca. 8 auf einen Wert >9 an. Durch die Brucit-Pufferung sinkt er mit dem Ausfall von Brucit auf einen geringeren pH-Wert (ca. 8,5) zurück. Nach Erreichen dieses pH-Werts setzt eine Abnahme von Brucit und die Bildung der Oxichloride der Phase 5-1-8 ein. Die Bildung der 5-1-8 Phase ist auf die Reaktion der 3-1-8 Phase mit Brucit zurückzuführen (Gl. 5). Im weiteren Verlauf des Reaktionsprozesses wird der Brucit vollständig verbraucht und die kontinuierliche Abnahme der Oxichloridanteile der 3-1-8 Phase mit gleichzeitigem Anstieg der Oxichloridanteile der 5-1-8 Phase setzt sich fort. Ist der Brucit verbraucht, beschränken sich die ablaufenden Reaktionen auf die Umwandlung der 3-1-8 Phase zur 5-1-8 Phase unter Abgabe von Mg^{2+} - und Cl^- -Ionen (Gl. 6), so dass am Ende des Reaktionsverlaufes nur noch Oxichloride der Phase 5-1-8 vorliegen. Während des Reaktionsprozessabschnitts zeigt sich auch hier eine Na^+ -Abnahme innerhalb der Lösung, wodurch ein weiterer Ausfall an Steinsalz erfolgen kann.



Die in Abb. 34 von SCHIRMER ET AL. (2013) vorgeschlagene Einteilung in vier Stufen des Reaktionsverlaufes basiert auf den von den anderen Phasen abweichenden Veränderungen bezüglich der Ausfällung und Auflösung von Brucit und Periklas. Stufe 1 ist gekennzeichnet durch die vollständige Umsetzung des restlichen Periklas. In Stufe 2 dominiert die Ausfällung von Brucit, wohingegen die Stufe 3 durch die vollständige Abnahme von Brucit geprägt ist. Stufe 4 umfasst die reine Umwandlung der Oxichloride der 3-1-8 Phase in die der 5-1-8 Phase. Am Ende der experimentellen Versuchszeit wird von Schirmer et al. (2013) ein sehr frühes Stadium der Stufe 1 geschlussfolgert, in der der erste Brucit beobachtet werden kann und die Oxichloride der 3-1-8 Phase noch

als thermodynamisch bevorzugte Phase vorliegen, bevor diese laut den Berechnungen in die 5-1-8 Phase umgewandelt werden.

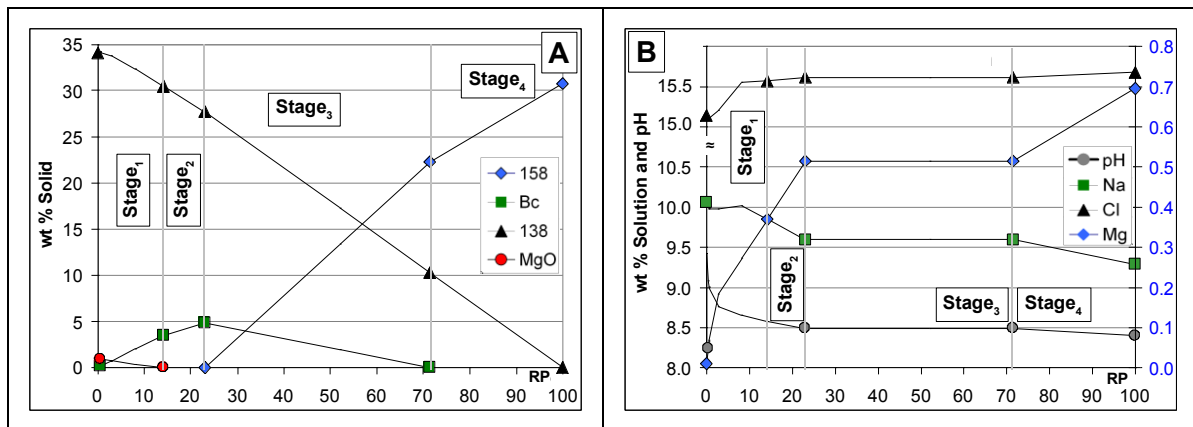
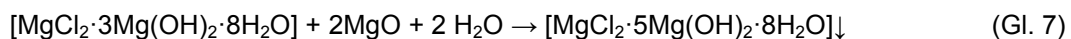


Abb. 34: Berechnete Entwicklung der Reaktionen von ausgehärteten Sorelbeton mit dominierender 3-1-8 Phase (A) und reine NaCl-Lösung (B); Mg-Konzentration im B-Diagramm wird der rechten Achse zugeordnet (SCHIRMER ET AL 2013). Abkürzungen: RP = Reaktionsfortschritt (%), wt = Gewichtsprozent, Bc = Brucit, 158 und 138 = Oxihydrate der Phasen 3-1-8 und 5-1-8.

Sorelbeton mit dominierender 3-1-8 Phase in Kontakt mit NaCl- dominierter Lösung mit niedrigem Mg-Gehalt

In Kontakt mit einer magnesiumarmen, halitgesättigten Lösung (0,9 Gw.% Mg-Gehalt) verändern sich nach SCHIRMER ET AL. (2013) zwar die Reaktionsprozesse im Sorelbeton während des Reaktionsverlaufes, das Ergebnis am Ende des Reaktionsverlaufes entspricht mit der vollständigen Umwandlung der 3-1-8 Phase in die 5-1-8 Phase aber dem der Reaktion von Sorelbeton mit reiner NaCl-Lösung.

In magnesiumarmer halitgesättigter Lösung und einem 3-1-8 dominierten Sorelbeton zeigen die Ergebnisse von SCHIRMER ET AL. (2013) zunächst eine Umsetzung des reliktschen Periklas und eine beginnende Umwandlung der Oxichloride der 3-1-8 Phase in die der 5-1-8 Phase (Gl. 7, entspr. Phase 1 in Abb. 35). Im Gegensatz zur Kontaktreaktion mit reiner NaCl-Lösung wird allerdings kein Brucit ausgefällt. Während der Periklas aufgebraucht wird, erhöht sich die Menge an Mg^{2+} -Ionen in der Lösung, während die Konzentration an Cl^- -Ionen leicht abnimmt. Nachdem der Periklas aufgebraucht ist, findet im weiteren Reaktionsprozess ausschließlich die Reaktion der Oxichloride der 3-1-8 Phase in die der 5-1-8 Phase statt (Gl. 6), wobei der Mg^{2+} - und in geringeren Mengen auch der Cl^- -Gehalt in der Lösung ansteigen (entspr. Phase 2 in Abb. 35). Der pH-Wert steigt zu Beginn von einem neutralen Wert (ca. 7) auf einen Wert von ca. 8,3 an, welcher während des Reaktionsfortschrittes relativ konstant bleibt.



In den Versuchen wurde am Ende des Versuchszeitraums ein leichter Rückgang der Oxichloride der 3-1-8 Phase beobachtet. Das entspricht den berechneten Reaktionsverhältnissen der Stufe 1.

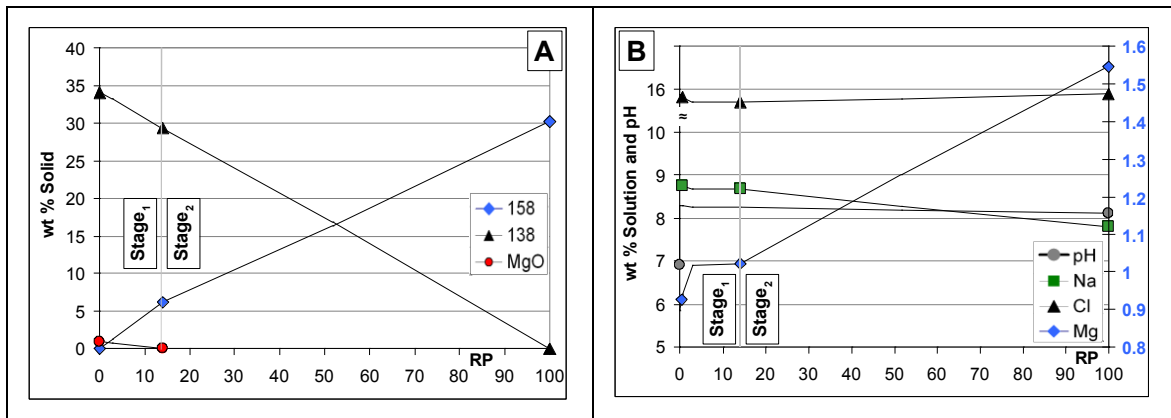


Abb. 35: Berechnete Entwicklung der Reaktionen von ausgehärteten Sorelbeton mit dominierender 3-1-8 Phase (A) und einer NaCl-Lösung mit Mg^{2+} Anteil (B); Mg-Konzentration im B-Diagramm wird der rechten Achse zugeordnet. (SCHIRMER ET AL. 2013); Abkürzungen: RP = Reaktionsfortschritt (%), wt = Gewichtsprozent, Bc = Brucit, 158 und 138 = Oxihydrate der Phasen 3-1-8 und 5-1-8.

Sorelbeton mit dominierender 3-1-8 Phase in Kontakt mit Lösung R (Mg-dominiertes System)

Während die zuvor betrachteten Lösungen (reine NaCl-Lösung und NaCl-Lösung mit Mg-Zusatz) eine chemische Reaktion der Oxichloride der Phase 3-1-8 hervorrufen, sind die von SCHIRMER ET AL. (2013) rechnerisch und experimentell ermittelten Reaktionen in Verbindung mit einer R-Lösung sehr gering. Einzige Beobachtung ist bei den experimentellen Ergebnissen ein leichter Anstieg der 3-1-8 Phase, was dafür sprechen könnte, dass kleine Mengen an freiem Brucit mit dem in der Lösung befindlichen Magnesium reagieren. Ein Sorelbeton mit einer dominierenden 3-1-8 Phase kann demnach im Kontakt mit $MgCl_2$ dominierenden Laugen als stabil eingestuft werden.

9.2.3 Einbindung der derzeitigen geochemischen Kenntnisse in das Modell 1 der Vorbemessung

Ziel des zu betrachtenden Vorbemessungsaspektes über die Veränderung und den Einfluss des geochemischen Milieus im Modell 1 ist die an die Temperaturveränderung gekoppelte Darstellung der abnehmenden Widerstandsfähigkeit des Bauwerks infolge der Alteration über den Funktionszeitraum der geotechnischen Barriere. Es soll gezeigt werden, inwieweit mögliche auftretende salinare Lösungen den Korrosionsfortschritt im Sorelbeton der 3-1-8 Phase beeinflussen und welche Änderungen hinsichtlich der Dichtigkeit und des Festigkeitsverlustes (mechanische Widerstandsfähigkeit) des Bauwerks zu den einzelnen Zeitpunkten der Temperaturveränderungen aus den eingelagerten Abfällen zu erwarten sind. Dazu sollte ein numerischer Vergleich der Permeabilitäten im Bauwerk, in der Kontaktzone und in der Auflockerungszone zwischen Anfangsdichtigkeit und -festigkeit und den Daten nach Korrosionseinfluss erfolgen, wobei bei der angreifenden Korrosion die im jeweils betrachteten Zeitabschnitt erhöhten Temperaturen berücksichtigt werden. Es ist jedoch festzustellen, dass die derzeit vorhandenen öffentlich zugänglichen Daten nicht ausreichen, um eine Vorbemessung nach dieser Methode durchzuführen.

Die im geschlossenen System durchgeführten thermodynamischen Untersuchungen von SCHIRMER ET AL. (2013) zeigen eine Korrosionsstabilität von Sorelbeton mit dominierender 3-1-8 Oxichloridphase gegenüber $MgCl_2$ -reichen Lösungen. In Kontakt mit reiner NaCl- bzw. NaCl-dominierte Lösung sind Reaktionen zwischen den Oxichloriden des Sorelbetons und den Lösungen feststellbar. Durch Phasenumwandlungen könnte der Beton seine mechanischen Eigenschaften einschließlich der Festigkeit verlieren. Eine Permeabilitätssteigerung wäre die Folge. Inwieweit die Ausfällung von Steinsalz angesichts des größeren Maßstabs eines Verschlussbauwerks dem entgegenwirkt, bleibt zu prüfen. In einer natürlichen Umgebung, und damit auslegungsrelevant, ist

ein offenes System zu erwarten, bei dem ein kontinuierlicher Zufluss der entsprechenden Lösungen gegeben ist, wodurch sich die Lösungszusammensetzung ändern kann. In diesem Fall ist ein Fortschreiten der im geschlossenen System ablaufenden Reaktionen zu erwarten. Wird an dieser Stelle der Extremfall einer zutretenden reinen NaCl-Lösung betrachtet, ergibt sich aus den Untersuchungen von SCHIRMER ET AL. (2013), dass die in dem Sorelbeton dominierende 3-1-8 Oxichloridphase bis zum vollständigen Verbrauch in Brucit und die Oxichloride der 5-1-8 Phase umgewandelt wird. Aus der sich anschließenden Reaktion der Oxichloride der 5-1-8 Phase zu Brucit und darauffolgenden Auflösung von Brucit resultiert ein vollständiger Zerfall des Barrierebauwerks. Auch im Hinblick auf eine MgCl_2 -haltige halitgesättigte Lösung kann eine ähnliche Schlussfolgerung gezogen werden, da am Ende nur noch die 5-1-8 Phase vorläge, die Oxichloride der 3-1-8 Phase und der Brucit wären verbraucht (SCHIRMER ET AL. 2013). Aus den Umwandlungen resultiert auch hier eine erhöhte Permeabilität, wodurch eine Abnahme der Festigkeit und der Dichtigkeit induziert werden könnte. Innerhalb einer Langzeitbetrachtung kann nicht vorhergesagt werden, welche Zusammensetzung der Lösung genau auftritt. Deshalb muss der eingesetzte Werkstoff gegenüber verschiedenen Lösungszusammensetzungen beständig sein. Die Untersuchungen von SCHIRMER ET AL. (2013) zeigen Instabilitäten des Sorelbetonbaustoffs gegenüber zwei beispielhaft gewählten salzstockexternen Lösungen (NaCl-Lösung und Lösung mit geringem MgCl_2 -Gehalt). Daher ist die Anwendung von Sorelbeton auf Mg-Oxichloridbasis als Baustoff für untertägige Verschlussbauwerke im Zusammenhang mit einer langzeitstabilen Auslegung für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle unter Einbezug der Materialwahl im Hinblick auf die Möglichkeit der Alteration durch Lösungen breitgefächerter zu überprüfen.

Ob Sorelbeton gegenüber einer NaCl-dominierte Lösung mit MgCl_2 -Anteilen, wie sie von KRAUKE & FLIß (2008), DINNEBIER ET AL. (2010) oder BECKER ET AL. (2009) untersucht werden, stabil ist, kann an dieser Stelle aufgrund der fehlenden Datengrundlage nicht geklärt werden. Eine solche Betrachtung wäre im Hinblick auf die Frage bedeutsam, wie durch geotechnische Maßnahmen die Empfindlichkeit des Baustoffes gegenüber ungesättigten Lösungen ausgeglichen werden kann. Ein dahingehender Ansatz wurde bei der Bauwerksauslegung innerhalb der VSG verfolgt. Zum Ausgleich bzw. zur Vermeidung der Korrosion des Sorelbetons im Schachtverschluss wurden geotechnische Maßnahmen durch eine ausreichende Opferschicht und ein Bischofitdepot vorgeschlagen. Die Mächtigkeit der Opferschicht steht im Zusammenhang mit der Umlösekapazität (BECKER ET AL. 2009 / RÜBEL & MÖNIG 2010 / NIEMEYER ET AL 2009). Dieser Parameter, ursprünglich auf zementbasierte Baustoffe angewendet, wurde bereits bei der Auslegung der Verschlussbauwerke für die geplante Stilllegung des ERAM herangezogen und jetzt auf die in der VSG dargestellten Planungen übertragen, wobei eine Übertragbarkeit dieses Parameters auf Sorelbeton in einigen Arbeiten dargelegt wird (BECKER ET AL. 2009 / RÜBEL & MÖNIG 2010 / NIEMEYER ET AL. 2009). Die Umlösekapazität beschreibt die Menge des Feststoffes, die von einem bestimmten Lösungsvolumen umgewandelt werden kann (RÜBEL & MÖNIG 2010). Dazu wird das Verhältnis des Bindemittelvolumens der festigkeitsbildenden Bindemittelphase (Masse mal Korndichte ohne Porenraum) und das minimale Lösungsvolumen, das notwendig ist, um die Menge der Bindemittelphase vollständig aufzulösen (Masse mal Lösungsdichte), abgebildet (MÜLLER-HOEPPE ET AL. 2012A). Aus dem damit beschriebenen Korrosionspotential wird gefolgert, dass mit steigendem Anteil des Lösungsvolumens die Korrosion des Bauwerks zunimmt (MÜLLER-HOEPPE ET AL. 2012A). Die Ergebnisse der Umlösekapazität bestimmen die vorzusehende Mächtigkeit der Opferschicht. Bei einer Übertragung des Vorgehens auf Sorelbeton würde nach BECKER ET AL. (2009) die Umlösekapazität aus der Magnesium-Gleichgewichtskonzentration und dem Gehalt der 3-1-8 Bindemittelphase berechnet werden und somit von dem Anteil der Mg-Oxichloride und der Mg-Sättigung der angenommenen Lösung abhängig sein. Bei der Auslegung des Verschlusssystems gegen salzstockexterne Lösungen zeigt sich, wie oben beschrieben, eine Instabilität des Sorelbetons. Um diese Einschränkung der chemischen Stabilität des Baustoffes auszugleichen,

wird im Schachtverschluss der VSG-Planungen ein Bischofitdepot oberhalb des untersten Dichtelementes aus Sorelbeton angelegt. Der in dem Depot befindliche Bischofit soll eine eventuell zutretende magnesiumarme Lösung mit Mg^{2+} -Ionen aufsättigen, sodass eine Korrosion vermieden wird und die Sorelbetonstabilität gegeben ist (MÜLLER-HOEPPE ET AL. 2012A). Durch diese Maßnahme wird von MÜLLER-HOEPPE ET AL. (2012A) das Korrosionspotential des Sorelbetons in Kontakt mit salzstockexternen Lösungen als „nicht vorhanden“ eingestuft.

Aufgrund der geotechnisch - konstruktiven Lösungsansätze zur Beherrschung einer Korrosion durch die Opferschicht bzw. zur Vermeidung durch das Bischofitdepot wird der Widerstand des Verschlussystems gegenüber chemischen Einwirkungen im Rahmen der VSG als gewährleistet angesehen (MÜLLER-HOEPPE ET AL. 2012B). Bei der positiven Prognose der geochemischen Langzeitstabilität der Streckenverschlüsse stützen sich MÜLLER-HOEPPE ET AL. (2012B) auf ein Zusammenwirken mit dem Schachtverschluss. Es wird davon ausgegangen, dass zutretende Lösungen erst nach Durchtritt der Lösungen durch den Schachtverschluss die Streckenverschlüsse erreichen (MÜLLER-HOEPPE ET AL. 2012A). Daraus wird abgeleitet, dass selbst bei einem Schachtverschlussversagen eine Aufsättigung mit MgCl_2 durch das im Schachtverschluss und das im Infrastrukturbereich der Erkundungssohle eingebrachte Bischofitdepot erfolgt, und der Streckenverschluss infolgedessen seine Funktion mit Bezug auf die chemischen Einwirkungen erfüllt (MÜLLER-HOEPPE ET AL. 2012B).

Es stellt sich die Frage, ob das geotechnische Konzept hinsichtlich der Auslegung des Streckenverschlusses ausreicht, um die Instabilität des Sorelbetons gegenüber MgCl_2 -armen Lösungen mit einem Bischofitdepot auszugleichen. In MÜLLER-HOEPPE ET AL. (2012B) wird darauf hingewiesen, dass z.B. die Porositäts-Permeabilitätsbeziehung von geschädigtem Steinsalz und somit die Korrosionseinwirkung auf das Bauwerk über die Auflockerungszone noch Stand der Forschung ist, das erhöhte Lösungspotential erwärmter Salzlösungen noch zusätzlicher Betrachtungen bedarf und die Kenntnisse über das geochemischen Verhalten von Kontaktzonen nicht versuchstechnisch untersetzt sind. Die dem Verschlussystem zugehörigen Bereiche der Auflockerungszone und der Kontaktzone könnten aufgrund der veränderten Angriffsfläche den Korrosionsfortschritt am Bauwerk erhöhen. Die Temperatur der eingelagerten Abfälle kann die Lösungsfähigkeit und damit die chemischen Prognosen der Alteration des Bauwerks verändern. Langfristig könnten diese Aspekte die Dichtigkeit und die mechanische Widerstandskraft des Bauwerks herabsetzen, wodurch die Funktionalität des Streckenverschlusses stark beeinflusst wäre (siehe Kapitel 10).

Um eine Vorbemessung nach dem vereinfachten Modell für ein Verschlussbauwerk mit einer eingeschränkten Lebensdauer durchzuführen, ist die Kinetik der ablaufenden Korrosionsprozesse, welche u.a. von der Angriffsfläche und der Lösungsfähigkeit der auftretenden Lösungen beeinflusst wird, von großer Relevanz, da der Fortschritt der Korrosion und Alteration des Verschlussbauwerks an den relevanten Zeitpunkten der Temperaturveränderung zu bestimmen ist. Notwendig ist dabei ein vertieftes Verständnis von Auflösungs- und Ausfällungsreaktionen einschließlich Beeinflussungen z.B. durch Druck, Temperatur, Stoffmengenkonzentration der Lösung, Festkörperzusammensetzung, Geometrie und Porenvolumen des Festkörpers, Zuflussmenge der MgCl_2 -armen Lösung und auch die Abflussmöglichkeit von Lösung höherer Dichte, als auch zur Kinetik der ablaufenden Prozesse. Im Zusammenhang mit diesbezüglichen Laborversuchen stellt sich auch die Frage der Übertragbarkeit auf die untätigen Verschlussbauwerke, die z.B. durch in-situ-Versuche zu belegen wäre.

Wegen des oben dargestellten Standes von Forschung und Entwicklung kann der Aspekt der geochemischen Veränderung im Sinne des Modells 1 der Vorbemessung und eine Überprüfung diesbezüglicher Funktionsindikatoren hier nicht abschließend dargelegt werden. Daher wird auch die an diese Ergebnisse gekoppelte Betrachtung zum Vorbemessungsaspekt: *Spannungseinwirkungen unter veränderten Materialeigenschaften* hier nicht dargestellt.

10 Weitere Aspekte im Zusammenhang mit der Auslegung und Nachweisführung von Streckenverschlussbauwerken

In diesem Kapitel werden weitergehende Gedanken der Autorin zu vier voneinander unabhängigen Aspekten dargelegt, deren Klärung für eine langzeitsichere Auslegung eines Streckenverschlussbauwerks als notwendig angesehen wird. Die Relevanz dieser Einzelaspekte ist im Rahmen einer Szenarienanalyse zu prüfen und zu bewerten.

Im Folgenden wird aufgezeigt, wie ausgewählte Aspekte Einfluss auf die Langzeitsicherheit nehmen können und welchen grundlegenden Überlegungen nachgegangen werden sollte, um die angestrebte Langzeitsicherheit der geotechnischen Barriere zu gewährleisten. Dabei werden auch bereits angesprochene Gesichtspunkte aus vorangegangenen Kapiteln einbezogen und gedanklich weitergeführt. Die folgenden Betrachtungen konzentrieren sich auf:

- das Wirtsgestein und den thermischen Einfluss aus den eingelagerten Abfällen,
- die Ausführungen zur geochemischen Langzeitstabilität in der VSG und die Auswirkung auf die mechanische Vorbemessung,
- die Anwendung des Eurocodes auf eine langzeitsichere Auslegung eines untertägigen Streckenverschlussbauwerks und
- den Einbezug von Rückhaltungsaspekten.

Das Wirtsgestein und der thermische Einfluss aus den eingelagerten Abfällen

Das hier vorgestellte Konzept basiert auf der Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle in Salzgesteinen. Steinsalz als Wirtsgestein zeichnet sich z.B. durch seine hohe Grenztemperatur (200°C) aus. Es ist praktisch undurchlässig und verhält sich plastisch-viskos, sodass das Auftreten von zusammenhängenden Klüften und Spalten weitgehend verhindert wird. Dieser Vorteil könnte sich bei der Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle unter Umständen auf den geplanten Endlageraufbau und damit auch auf darauf basierende Berechnungen auswirken. Gemeint ist damit ein mögliches Absinken der gegenüber Salz schwereren Einlagerungsbehälter bei Einsetzen des Fließens von Salz infolge Temperaturerhöhung. In WOLF ET AL. (2012) wird darauf hingewiesen, dass ein Absinken von Behältern möglich ist. Eine vereinfachte Rechnung mit den Abmessungen und der Dichte eines Pollux-Behälters und dem Kriechgesetz (siehe BRÄUER ET AL. 2011) für 22 °C unter Anwendung des Gesetzes von Stokes ergab, dass der Behälter um ca. 2 m in 1 Mio Jahre nach unten sinken würde. Abgesehen davon, dass derzeit noch nicht festgelegt worden ist, welche Art von Behälter für die Einlagerung genutzt wird, kann in dem aufgeführten Beispiel davon ausgegangen werden, dass sich unter den höheren Temperaturen, wie sie im Einlagerungsbereich vorliegen (max. 200 °C), höhere Absenkungen ergeben werden. Eine dahingehende Prüfung sollte die nicht-lineare Abhängigkeit der Viskosität von der Temperatur einbeziehen. Des Weiteren wäre zu prüfen, ob der Berechnungsansatz über das Gesetz von Stokes (Anwendung vorwiegend bei Flüssigkeiten) für viskose Festkörper ausreichend ist oder ob andere Ansätze herangezogen werden sollten.

Die Absenkung von Behältern im Einlagerungsbereich spielt für die Auslegung eines Streckenverschlussbauwerks dahingehend eine Rolle, dass sich infolge der durch die Absenkung entfernenden Wärmequelle die Temperaturentwicklung am Verschlussbauwerk verändern könnte. Damit würde sich die dadurch gegebene Einwirkung auf die chemischen, mechanischen und möglicherweise auch die hydraulischen Gegebenheiten ändern. Angesichts der vorgesehenen Abmessungen des Endlagerbergwerks, insbesondere der Abstände der Streckenverschlüsse von den eingelagerten Behältern (Abb. 32), wären diesbezüglich bedeutsame Auswirkungen allerdings

erst vorstellbar, wenn sich in der relativ kurzen Zeitphase des Temperatureinflusses die Behälter um mehrere 10er Meter verschieben würden.

Es scheint ratsam, die Behälter-Absenkungen mit Bezug auf die thermische Entwicklung der eingelagerten Abfälle eingehender zu betrachten, um mögliche Veränderungen der Temperaturfelder (u.a. an den geotechnischen Barrieren) feststellen zu können. Auch das Entgegenwirken des langfristig einzubeziehenden Diapirismus und die Bedeutung hinsichtlich anderer Aspekte des Konzepts (z.B. Entfernung zu Wegsamkeiten) wären zu prüfen.

Ausführungen zur geochemischen Langzeitstabilität bei den VSG-Planungen und die Auswirkung auf die mechanische Vorbemessung

Wie in Kapitel 8.2 angesprochen, weist der derzeitig geplante Baustoff für ein Streckenverschlussbauwerk (Sorelbeton 3-1-8) gegenüber MgCl_2 -armer salzstockexterner Lösung Probleme hinsichtlich der Stabilität auf. Durch die Auflösung und Umlösung der Mineralphasen des Bindemittels in der Sorelbetonstruktur, hervorgerufen durch den veränderten Volumenbedarf der Reaktionsprodukte, kann es zu einer Schwächung der Tragfähigkeit und einer Veränderung der Porosität/Permeabilität im Betonkörper und dessen Kontaktzonen zum umgebenen Salzgestein kommen. Im offenen System würde unter extremen Bedingungen ein vollständiges Verschwinden der Sorelphasen (3-1-8 und 5-1-8) eintreten, wodurch die strukturelle Stabilität weitgehend verloren gehen würde. Dies kann in langzeitlichen Betrachtungen große Auswirkungen auf die Einhaltung der primären Sicherheitsfunktion (Ver- und Behinderung eines Lösungszutritts) mit sich ziehen. In den Planungen der VSG wurden dahingehend konstruktive Maßnahmen für den Schachtverschluss entwickelt. Eine Opferschicht im Salzbeton und ein Bischofitdepot vor dem Sorelbeton sollen die Korrosionsfähigkeit der zutretenden Lösungen abschwächen bzw. die Lösung aufhalten. Aussagen über die geochemische Langzeitstabilität des entfernter gelegenen Streckenverschlussbauwerks werden auf die chemische Barriere des Bischofitdepots im Schachtverschluss und im Infrastrukturbereich aufgebaut.

In dieser Arbeit wird eine unabhängige Auslegung beider Verschlussbauwerksarten als vorteilhaft angesehen. Ein Nachweis der geochemischen Langzeitstabilität durch eine Kopplung unterschiedlicher Bauwerksarten wird aufgrund der bestehenden Unsicherheiten und Ungewissheiten als nicht vollständig belegbar eingestuft. Darunter zählen u.a. die geochemischen Prozesse in der Kontaktzone, die Porositäts-Permeabilitätsbeziehung von geschädigtem Steinsalz und damit die Korrosionseinwirkung über die Auflockerungszone, als auch das gegenüber einigen Komponenten erhöhte Lösungspotential sich erwärmender Lösungen infolge der Temperaturentwicklung der radioaktiven Abfälle. So sind folgende Abläufe möglich, die die Sicherheitsfunktion des Barrierebauwerks einschränken können:

Eine mögliche korrosionsbedingte Vergrößerung der Kontaktzone durch zutretende MgCl_2 -arme Lösungen verringert den Kontakt des Bauwerks zum umgebenden Gestein und ermöglicht somit eine Wegsamkeit, wodurch auftreffende Lösungen das Verschlussbauwerk umfließen können.

Ähnliche Abläufe sind auch bei der sich anschließenden Auflockerungszone möglich. Diese verläuft mit Unterbrechungen parallel zum Schacht (als auch der Strecken) und wird von MÜLLER-HOEPPE ET AL. (2012B) als bestimmend für die Systempermeabilität beschrieben. Zwar gilt die Auflockerungszone nicht zwangsläufig durchlässiger als der Baukörper, doch wurde infolge des geringeren Speichervolumens ein schnelleres Voranschreiten der Lösungsfront in der Auflockerungszone festgestellt (MÜLLER-HOEPPE ET AL. 2012B). Dadurch kann das Bauwerk grundsätzlich auch über die Auflockerungszone aufgesättigt werden (MÜLLER-HOEPPE ET AL. 2012B). Die Korrosionsangriffsfläche der Lösung am Bauwerk wird daher

vergrößert. Weiterhin besteht die Möglichkeit, dass die Auflockerungszone durch die schnelle Aufsättigung als Umläufigkeitsbereich zur Verfügung steht. Es wäre zu klären, inwieweit NaCl-dominierte Lösung das Schachtverschlussbauwerk umlaufen und in die Strecken bis zu den Streckenverschlüssen zutreten könnte. Korrosionsbedingte Veränderungen von Bauwerkeigenschaften werden durch eine Variation der Veränderung der Permeabilitäten oder Porositäten modelliert, wobei der direkte Zusammenhang zwischen der Veränderung der Porosität und Permeabilität durch Mineralneubildungen und -auflösungen in den Programmen bisher nicht berücksichtigt wurde (SEHER & BRACKE 2012).

Des Weiteren ist die chemische Langzeitstabilität des Schottermaterials im Bischofitdepot von Bedeutung. Da der technische Bischofit nicht eigentragfähig ist, dient der Schotter als Widerlager, damit keine Setzungen erfolgen und eine Volumenverringerung des benötigten Hohlraums vermieden wird. Die Porenraumstruktur des Schotters fungiert als Speicher für die $MgCl_2$ -Lösung, die sich bei Zutritt von Lösungen mit dem Bischofit entwickelt. Derzeit geplantes Material ist ein Basalt- / Serpentinitschotter (MÜLLER-HOEPPE ET AL. 2012A). Während sich Schotter aus Magnesit oder Serpentin gegenüber $MgCl_2$ -reichen Lösungen thermodynamisch stabil verhält, wird ein Basaltschotter im Kontakt mit einer $MgCl_2$ -reichen Lösung im Laufe der Zeit unter Bildung von Albit, Mg-Chlorit und Montmorillonit und weiteren sekundären Silikaten reagieren. Vergleichbare Vorgänge sind bei der Spilitisierung von basaltischen Gesteinen zu beobachten (WIMMENAUER 1985). Durch den Reaktionsumsatz kann in solchen Schottergesteinen ein partieller oder vollständiger Verlust des Gesteinsverbandes eintreten, welcher die Widerlager- und Speicherfunktion stark einschränken oder aufheben würde.

Aufbauend auf den technischen Maßnahmen für den Schachtverschluss aus den VSG-Planungen und der in dieser Arbeit befürworteten Trennung der Auslegung von Verschlussbauwerksarten, erscheint es sinnvoll, den Einsatz einer Opferschicht für angreifende Lösungen hinsichtlich der Übertragbarkeit auf ein Streckenverschlussbauwerk zu prüfen. Die Mächtigkeit der Opferschicht ergibt sich aus der Umlösekapazität. Diese ist abhängig vom Bindemittelvolumen und dem Lösungsvolumen, das notwendig ist, um die Menge der Bindemittelphase vollständig aufzulösen. Darauf basierende Berechnungen zeigen, dass lange Abdichtungen aus Salzbeton langsamer korrodieren als kurze, wobei die Korrosionsfront umgekehrt proportional zur Länge der Abdichtung voranschreitet und die Dauer bis zur vollständigen Korrosion quadratisch mit der Länge ansteigt (NIEMEYER ET AL. 2009). Für Abdichtungen aus Sorelbeton besteht, ausgelöst durch die Magnesiumkonzentration der angreifenden Lösung, eine abweichende Korrosionsgeschwindigkeit (NIEMEYER ET AL. 2009). BECKER ET AL. (2009) übertragen die Berechnungen der Umlösekapazität auf Sorelbeton, indem sie den Gehalt der 3-1-8 Bindemittelphase und der Magnesiumkonzentration der Lösung einbeziehen. Ob dieses Vorgehen der tatsächlichen Korrosionsgeschwindigkeit entspricht, bleibt an dieser Stelle offen. DAHLHAUS & HAUKE (2012) verweisen darauf, dass die Korrosionsgeschwindigkeit der Oxichloridphasen u.a. von der zugänglichen Angriffsoberfläche für die salinaren Lösungen abhängig ist, die ihrerseits von der Verteilung der Mikrorisse in der Betonmatrix abhängt. Die räumliche Verteilung der Mikrorisse ist u.a. abhängig von der Umbildung der Phasen (DAHLHAUS & HAUKE 2012).

Welche Verteilung der auftretenden Mikrorisse zu erwarten ist und welche Zusammensetzung eine zutretende Lösung haben wird, scheint nicht vorhersagbar. Im Kontakt mit einem Sorelbeton mit der Phase 3-1-8 mit einer $MgCl_2$ -armen oder einer reinen NaCl-Lösung steigt im Verlauf der Reaktion der Magnesiumgehalt in der Lösung an. Daraus kann geschlossen werden, dass sich durch eine ausreichende Länge des Bauwerks eine gesättigte Konzentration der Lösung einstellen könnte und hintere Bereiche des Verschlussbauwerks unbeeinflusst von der Korrosion bleiben. Im Gegensatz zum Schachtverschlussbauwerk (waagerechte Fläche) trifft eine Lösung bei einem

Streckenverschlussbauwerk auf eine senkrechte Fläche. Bei senkrechten Lösungsflächen bildet sich ein gesättigter Lösungsfilm an der Grenzfläche. Die aus der Reaktion zwischen Lösung und Bauwerk resultierende Mg-konzentrierte Lösung besitzt eine höhere Dichte und wird aufgrund der Schwerkraft auf die Sohle der Strecke absinken. Durch diesen Vorgang reichert sich dichtere Lösung (MgCl_2 -dominiert) an der Sohle an, während die Lösung mit geringerer Dichte (NaCl -dominiert) an der Firste weiter angreift. Bei einem Lösungszutritt infolge eines Schachtversagens würde ein offenes System vorliegen, wodurch Lösung mit geringerer Dichte kontinuierlich nachfließen und, durch die unterschiedlichen Dichten der Lösungen bedingt, eine Strömungsbewegung einsetzt. Demnach wird der Bereich des Bauwerks an der Firste stärker der Korrosion unterworfen und die Auflösung in diesem Bereich daher schneller voranschreiten, wodurch auch die Eigenschaften der Kontakt- und Auflockerungszone beeinflusst werden könnten. Es wäre zu untersuchen, wann und ob diese Strömungsvorgänge enden und inwieweit das Streckenverschlussbauwerk verlängert werden müsste, um einer entsprechend großen Lösungsmenge während seiner vorgesehenen Lebensdauer standzuhalten.

Neben den bereits angesprochenen Aspekten wird es als notwendig angesehen, die im Rahmen der VSG durchgeführten Untersuchungen bezüglich des Temperatureinflusses (hervorgerufen durch die eingelagerten Abfälle) auf die chemischen Vorgänge zu vertiefen. Dies betrifft gleichwohl die Barrierebaustoffe als auch die potenziell möglichen Lösungen.

Neben den bereits in Kapitel 7.2.1 angesprochenen Auswirkungen auf salinare Lösung könnten sich auch die eingesetzten Baustoffe verändern. In den Untersuchungen von XIA ET AL. (1991) wird eine Veränderung der Molverhältnisse innerhalb der Oxichloridphase bei Erhitzungsversuchen von Sorelbeton festgestellt. Das Oxichlorid 3-1-8 verändert sich bei einer für Gorleben relevanten Temperatur von 62 °C zu einem Oxichlorid 3-1-5,5. Das dadurch freigesetzte Wasser (2,5 Mol pro Mol 3-1-8) steht dadurch für weitere Reaktionen zur Verfügung. Insbesondere würde sich dieses Wasser an NaCl sättigen und damit einen Hohlraum erzeugen können. Mit steigender Temperatur wurde von XIA ET AL. (1991) eine weitergehende Dehydration der Oxichloride beobachtet, bis das Oxichlorid bei einer Temperatur von 200 °C wasserfrei wurde (3-1-0). Hierbei bilden sich wasserfreies MgCl_2 oder Periklas aus.

Dieser Prozess wirft umkehrend die Frage auf, ob zur Absicherung der Funktionsfähigkeit des Bauwerks Bereiche mit hygroskopischem Zement innerhalb eines Verschlussbauwerks sinnvoll wären. Würde zutretende Lösung auf einen Sorelbeton der 3-1-0 Phase treffen, könnte eine Umwandlung in die 3-1-8 Phase erfolgen, wobei der dadurch bedingte H_2O -Entzug aus der Lösung eine Ausfällung von NaCl induzieren könnte.

Durch die obenstehenden Überlegungen, wird die Wichtigkeit einer Gesamtbetrachtung des Streckenverschlusses (Baukörper, Kontaktzone, Auflockerungszone) unter Einbezug auftretender Temperaturveränderung für die Gewährleistung einer langzeitsicheren Auslegung deutlich. Um eine vollständige Einschätzung und Beurteilung der geochemischen Vorgänge an einem Verschlussbauwerk erhalten zu können, ist noch ein erheblicher Anteil an Forschungs- und Nachweisarbeit erforderlich.

Die Aussagen der geochemischen Langzeitstabilität sind grundlegend, um den Nachweis einer mechanischen Vorbemessung zu führen. Bedingt durch eine fortschreitende Korrosion des Bauwerks könnte eine Veränderung der Widerstandskraft eintreten. Stehen Daten für den (geo)chemischen Vorbemessungsaspekt zur Verfügung, kann der Vorbemessungsaspekt Spannungseinwirkungen unter veränderten Materialeigenschaften betrachtet werden. Dabei ist der Einbezug von zeitlich bedingten Spannungsänderungen in den mechanischen und hydraulischen Nachweisen zu berücksichtigen. Dahingehende Ansätze werden bereits in den Ausführungen der VSG betrachtet. Eine ausführliche Betrachtung von mechanischen und hydraulischen Nachweisen

wird von MÜLLER-HOEPPE ET AL. (2012A, B) durchgeführt. Dabei wird auch die Gasentwicklung einbezogen, die in dieser Arbeit zurückgestellt wird. Die durchgeführten Berechnungen spiegeln aber, aufgrund der Vernachlässigung von Alteration und Korrosion, nur die Situation bei einem gleichbleibenden Widerstand des Bauwerks wider. Sie sind nach Meinung der Autorin in der durchgeführten Form nur für ein Bauwerk ohne langzeitbeeinflussende Einwirkungen beschrieben und entsprechen demnach einem Nachweis für die frühe Nachbetriebsphase. Um einen abschließenden Langzeitsicherheitsnachweis zu erbringen sind weiterführende Betrachtungen hinsichtlich der chemischen Milieuentwicklung mit der Bestimmung des möglichen Widerstandsverlustes, des Einbezugs möglicher Intensivierungen von langzeitrelevanten Einwirkungen und der Erweiterung der Betrachtung auf die Einzelelemente des Streckenverschlussystems hinsichtlich der Durchflussrate/Durchsickerungszeit notwendig.

Anwendung des Eurocodes für eine langzeitsichere Auslegung eines untertägigen Streckenverschlussbauwerks

In den ingenieurtechnischen Sicherheitsnachweisen innerhalb der Auslegung muss die Überlegung erfolgen, wie die Zuverlässigkeit eines untertägigen geotechnischen Verschlussbauwerks konzeptionell nachgewiesen werden soll. In Kapitel 4.2 wurde festgestellt, dass derzeit keine bautechnische Norm zur Bemessung eines Untertagebauwerks in einem Endlager vorliegt. Die vorhandenen Normen wurden für übertägige bzw. oberflächennahe Konstruktionen erstellt und sollen für diese Bauwerke durch eine vorgegebene untere Zuverlässigkeitsgrenze ein möglichst einheitliches Zuverlässigkeitsniveau garantieren (FISCHER 2001). Dabei wird eine Ausbesserungsmöglichkeit und eine gegenüber einer langzeitlichen Bemessung geringe Lebensdauer (max. 100 Jahre) vorausgesetzt.

Zur Absicherung der Zuverlässigkeit der Bauwerksfunktion können zwei Konzepte angewandt werden: das globale Sicherheitskonzept und das Teilsicherheitskonzept. In beiden Sicherheitskonzepten ist eine sichere Auslegung gegeben, wenn der Widerstand des Bauwerks höher als die auftretenden bzw. zu erwartenden Einwirkungen ist (ZIEGLER 2008B / WEIßENBACH 1998 / FISCHER 2001).

Das globale Sicherheitskonzept leitet sich aus dem Prinzip der zulässigen Spannungen ab, worin festgelegt ist, dass die tatsächlichen Einwirkungen kleiner als der Widerstand des Baustoffs bzw. des Bauwerks sein müssen. Zur Gewährleistung der Sicherheit werden die Werte für die Materialfestigkeiten (Widerstand) mit einem globalen Sicherheitsbeiwert versehen, die Werte also herabgesetzt. Dagegen werden die Einwirkungen i.d.R. nicht mit einem Sicherheitsbeiwert versehen (ZIEGLER 2008A, B). Der globale Sicherheitsbeiwert stellt damit einen zentralen Sicherheitsfaktor dar, der sämtliche Unsicherheiten (z.B. Ungewissheiten, Messungsungenauigkeiten, Streuung der Materialkennwerte) abdeckt, und erst am Ende der Berechnungen berücksichtigt wird (WEIßENBACH 1998).

Das Teilsicherheitskonzept (Methode der Grenzzustände) verspricht eine genauere Auslegung des Bauwerks, indem nicht nur der angenommene Widerstand mit einem Teilsicherheitsbeiwert reduziert, sondern auch die zu erwartenden Einwirkungen mit einem Teilsicherheitsbeiwert vergrößert werden (DIN EN 1990 2010 / ZIEGLER 2008A, B). Das Sicherheitsniveau des globalen Sicherheitskonzeptes bleibt nach RIEHWIEN & LESNY (2003) und VOIGT ET AL. (2006) beim Teilsicherheitskonzept in etwa erhalten. Durch die Anwendung von Teilsicherheitsbeiwerten ist allerdings die Möglichkeit gegeben, einzelne Einwirkungen oder Materialparameter je nach ihrer Datenqualität und Wertigkeit für die Gleichung des Grenzgleichgewichtes unterschiedlich zu gewichten (ZIEGLER 2008B). Sind beispielsweise die Eigenschaften einer Einflussgröße genau bekannt, dann ist der Teilsicherheitsbeiwert annähernd bzw. genau 1. Sind die Eigenschaften nicht

bekannt, z.B. bei dynamischen Einwirkungen, kann der Verlauf nur abgeschätzt werden, weshalb der Teilsicherheitsbeiwert erhöht wird.

Die Teilsicherheitsbeiwerte werden zur Ableitung von Bemessungswerten für Einwirkungen (Beanspruchung), Widerstand, Eigenschaften für Materialien und Bauteile, geometrischer Größen als auch für die Nachweise der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit genutzt. Im Allgemeinen werden die Bemessungswerte aus den repräsentativen Werten und den Teilsicherheitsbeiwerten berechnet. Sie können nach DIN EN 1997-1 (2009) aber auch direkt festgelegt werden. Die für die Berechnung notwendigen Teilsicherheitsbeiwerte sind je nach Art der Einwirkung und je nach Bemessungssituation unterschiedlich. Eine ausreichende Sicherheit gilt als gegeben, wenn die Summe der Bemessungswiderstände zu jeder Zeit größer ist als die Summe der Bemessungseinwirkungen (ZIEGLER 2008A). Treten einzelne Einwirkungen gleichzeitig auf, werden zur Bestimmung der Auswirkung der Einwirkungen Kombinationsregeln und -berechnungen angewandt, die sich nach der jeweiligen Bemessungssituation richten. Dabei wird bei mehr als einer veränderlichen Einwirkung nur die dominierende Einwirkung (Leitwirkung) voll berücksichtigt, während alle weiteren Einwirkungen als Begleiteinwirkungen mit einem Kombinationsbeiwert multipliziert werden.

Die Methode der Grenzzustände hat sich im Ingenieurbau durchgesetzt, was sich auch in den Euronormen DIN EN 1990ff niederschlägt. Eine Übersicht über die grundsätzlichen Ansätze des Eurocodes wird in Kapitel 4.2.2 gegeben. Obgleich das Teilsicherheitskonzept bei der Bemessung von Bauwerken besonders auf verformungsbeeinflusste Traglastprobleme sehr erfolgreich angewendet wird, bleibt die Frage nach der Anwendbarkeit auf untertägige Verschlussbauwerke in einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle bestehen. Die Methode der Grenzzustände ist ihrem Wesen nach eine semi-probabilistische Methode und stellt somit eine Bemessungsmethode dar, die zwischen rein deterministischen Methoden und rein stochastischen Methoden steht (FISCHER 2001). Während bei deterministischen Methoden die Berechnungen auf einzelnen fixen Werten beruhen, die den Nominal-, Referenz- oder konservativen Wert repräsentieren, werden für stochastische (probabilistisch) Methoden Verteilungsmodelle für die Eingangsgrößen benötigt. Mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitstheorie und der Statistik erfolgt bei der stochastischen Methode eine auf Modellierungen basierende Untersuchung von Zufallsgeschehen als auch eine Beschreibung und Analyse von Vorgängen die zufällig erscheinen. Das Maß für die Sicherheit der Bauwerkskonstruktion ist durch die Versagenswahrscheinlichkeit gegeben und wird für einen bestimmten Bezugszeitraum betrachtet (FISCHER 2001). Damit unterscheidet sich ein probabilistischer Nachweis grundlegend von einem deterministischen Nachweis, der das (rechnerische) Versagen mathematisch ausschließt (RIECHWIEN & LESNY 2003).

Bei der semi-probabilistischen Methode wird der zufällige Charakter der Einwirkungen und der Baustoffeigenschaften über statistische und wahrscheinlichkeitstheoretische Ansätze näherungsweise erfasst (FISCHER 2001). Dabei wird ein vereinfachtes Verteilungsmodell zugrunde gelegt, aus dem die charakteristischen Werte (z.B. Quantilwerte) für die jeweiligen Bemessungswerte abgeleitet werden. Die Bemessungswerte dienen als Eingangsdaten im anschließenden deterministischen Modell, wo anhand der Zuverlässigkeitstheorie der Grenzzustand des charakteristischen Wertes geprüft wird.

Die Voraussetzung für die Anwendbarkeit der Methodik sind bekannte Verteilungsfunktionen für Beanspruchungen (Einwirkungen) und Beanspruchbarkeiten (Widerstände). Der Eurocode strebt in diesem Zusammenhang die Normalverteilung als vereinfachtes Verteilungsmodell an. Allerdings sind die Verteilungsfunktionen nicht immer bekannt bzw. können nicht immer belegt werden, so dass eine Annäherung an Normalverteilungen nicht immer angemessen erscheint. Zur Rechtfertigung werden im klassischen Bauwesen Erfahrungen herangezogen, die aber hinsichtlich des Langzeitsicherheitsnachweises nicht oder nur begrenzt zur Verfügung stehen. Dies gilt insbeson-

dere für die Beanspruchungsseite (Prognoseproblem). Generelles Problem dabei sind die komplexen THMC-Zusammenhänge der langfristig auftretenden Einwirkungen (Kapitel 7).

Das Problem von unzureichenden Datenmengen für die Einwirkungen und Widerstände beeinflusst die für die Auslegung notwendige Ableitung von Verteilungen und damit die Festlegung der Bemessungs- und Teilsicherheitsbeiwerte. Ein Bemessungswert kann entweder mit Hilfe von Teilsicherheitsbeiwerten und repräsentativen Werten abgeleitet werden oder direkt festgelegt werden (DIN EN 1997-2 2009). Repräsentative Werte können charakteristische Werte oder, bei Kombinationen, Begleitwerte sein. Dienen charakteristische Werte für die Ermittlung von Einwirkungen, werden zur Bestimmung des repräsentativen Wertes diese mit einem Kombinationsbeiwert multipliziert (DIN EN 1997-2 2009 Abschnitt 2.4.6.1). Als charakteristische Werte werden die Kenngrößen der Verteilung (Mittelwert, Quantil) definiert. Dabei entspricht der Mittelwert demnach einem Mittelwert des vorgegebenen Zuverlässigkeitsbereiches. Um eine statistische Aussage mit einer erforderlichen Genauigkeit treffen zu können, werden ausreichende Daten benötigt. Die Basis bilden dabei Daten aus Experimenten zu Baustoffen, Bauteilen und Bauwerken. Im Zusammenhang mit einem Streckenverschlussbauwerk liegen diesbezüglich derzeit nur eingeschränkte Datenmengen vor, wodurch sich die Frage stellt, ob die wenigen Daten für eine angemessene Statistik ausreichend sind. Im Allgemeinen kann mit Hilfe von Schätzwerten und durch die in diesem Zusammenhang angewandte Vernachlässigung einzelner „Ausreißer-Datenpunkte“ eine (möglicherweise die gewünschte) Verteilungsfunktion abgeleitet werden. Diese Vorgehensweise ist legitim, doch bewegen sich die Schätzwerte nur um die tatsächlichen Werte, und ob wenige Werte eine ausreichende Aussage treffen können sei dahingestellt. Unter Annahme einer bekannten Verteilung hängt die Wahl des charakteristischen Wertes wesentlich von der Form der Verteilung (insbes. Streuung) und vom zeitlichen Verhalten der jeweiligen Größe ab. Der bei zeitlich veränderlichen Beanspruchungen im klassischen Bauwesen auf der Beanspruchungsseite übliche Ansatz (Quantil, das im Betrachtungszeitraum im Mittel einmal überschritten wird), ist aber vermutlich wegen der langen Betrachtungszeiträume nicht übertragbar (siehe unten).

Ist eine statistische Verteilung unbekannt, kann laut DIN EN 1990 (2010) Abschnitt 4.1.2 (7) der charakteristische Wert von veränderlichen Einwirkungen auch als Nennwert angegeben werden. Da dieser Wert nicht auf einer statistischen Grundlage ausgewiesen ist, wird er aufgrund von Erfahrungen oder physikalischen Bedingungen festgelegt (DIN EN 1990 2010). Die Vorgehensweise, auf Statistik und Wahrscheinlichkeitstheorie zu verzichten, scheint hinsichtlich der angestrebten sicheren Auslegung und der im Eurocode verfolgten methodischen Grundlage des Grenzzustandes, worin der charakteristische Wert der Grundgesamtheit ein wesentliches Element ist, widersprüchlich, da für einen Nennwert der Schluss von der Stichprobe auf die Grundgesamtheit nicht nachzuvollziehen ist (FISCHER 2001). Ungeachtet dessen stellt sich bei einer Festlegung von Nennwerten mithilfe von Erfahrungswerten die Frage, ob genügend Erfahrungen beim Einsatz eines Streckenverschlussbauwerks, dessen Materialien und insbesondere der Bestimmung eines Nennwertes für auftretende Einwirkungen vorliegen. Letztendlich sind zwar acht von den zehn dokumentierten Streckenverschlussbauwerksplanungen (einschließlich der Versuchsbauwerke) in Deutschland umgesetzt, doch wurde nur bei zwei Verschlussbauwerken Sorelbeton (Versuchsbauwerk Bleicherode) bzw. ähnliches Material (Leopoldshall) verwendet (Kapitel 4.1). Ein Verschlussbauwerk mit Material und Design wie es für Gorleben geplant ist wurde noch nicht gebaut. Einzige ähnliche und daher eingeschränkt vergleichbare Barrierebauwerke sind das Versuchsbauwerk eines Streckenverschlusses in Bleicherode und eine der Pilotströmungsbarrieren im Grubengebäude der Asse II. Am Strecken-Versuchsbauwerk Bleicherode zeigten sich über den Erwartungen liegende Abbindetemperaturen (bis 110 °C) als auch ein relativ schnell absinkender Quelldruck, der eigentlich zur Überpressung der Kontaktzone und der Einspannung des Bauwerks dienen soll (MAUKE & HERBERT 2013, IMU 2011, BFS 2013). Die Abweichungen der Quelldruckentwicklung zu den zuvor erfolgreich durchgeführten Laborversuchen verdeutlicht die

Übertragbarkeitsproblematik zwischen Labor und Großversuch, wodurch auch die Notwendigkeit von in-situ-Test veranschaulicht wird. Abgesehen davon, dass die Pilotströmungsbarriere A1 im Grubengebäude der Asse II nicht mit der Zielsetzung eines Streckenverschlussbauwerks ausgelegt wurde und die Ergebnisse des Abdichtbauwerks in Bleicherode auf einen Modifizierungsbedarf des Baustoffs und Konzeptes hinweisen, ist es fraglich, ob die dort ermittelten Daten zur Bestimmung von Nennwerten als auch möglicherweise von charakteristischen Werten ausreichend sind. Besonders die Bestimmung von veränderlichen Einwirkungen wird sich aufgrund der Komplexität (Aspekt gegenseitige Beeinflussungen) als schwierig gestalten und kann daher nur auf realitätsnahen THMC-Modellierungen beruhen. Aufgrund dessen, dass keine Möglichkeit der Ausbesserung besteht und ein Versagen des Verschlussbauwerks in einem Endlager für hochradioaktive Abfälle weitreichende Folgen für Mensch und Umwelt haben können, erscheint der Autorin die Festlegung von Nennwerten mit Hilfe von Erfahrungswerten bedenklich.

Ähnliche Bedenken wie bei den charakteristischen Werten ergeben sich auch bei der Betrachtung der Teilsicherheitsbeiwerte. Die Teilsicherheitsbeiwerte dienen in Verbindung mit dem charakteristischen Wert zur Herleitung der Bemessungswerte und sind je nach Art der Einwirkung und Bemessungssituation unterschiedlich. Sie decken die Unsicherheiten der Baustoffeigenschaften (Widerstand) und der repräsentativen Werte der Einwirkungen, als auch der jeweiligen Modellunsicherheiten ab (DIN EN 1990 2010 - C.9). SCHUPPENER (2012) weist in diesem Zusammenhang darauf hin, dass die Teilsicherheitsbeiwerte nicht die Streuung der Einwirkungen oder geometrischen Kenngrößen beachten, da diese bereits bei der Festlegung der charakteristischen Werte berücksichtigt werden. Die Zahlenwerte für die Teilsicherheitsbeiwerte können entweder aus den Normen (z.B. Eurocode) entnommen werden oder basieren auf der Grundlage von statistischen Auswertungen von Versuchsdaten und Baustellenbeobachtungen im Rahmen einer probabilistischen Wahrscheinlichkeitstheorie basieren (QUAST 2002). Berechnet werden die Teilsicherheitsbeiwerte mit Hilfe der Zuverlässigkeitstheorie. Für eine konkrete Bemessung ergibt sich der Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstand (Material) aus dem Quotienten von Quantilwert und Bemessungswert, bei den Einwirkungen dagegen ist es der Quotient aus Bemessungswert und Quantilwert (FISCHER 2001). Der Quantilwert entspricht der für das Bauwerk akzeptierten Versagens- bzw. Zuverlässigkeitswahrscheinlichkeit. Der Bemessungswert wird direkt durch die (log) Normalverteilung (bei veränderlichen Einwirkungen durch eine Extremwertverteilung) bestimmt. Die Berechnung des Bemessungswertes erfolgt unter Einbezug des Mittelwertes, des Variationskoeffizienten, des Wichtungsfaktors, des Sicherheitsindex und eines Korrekturfaktors. Neben den dadurch berechneten einzelnen Baustoffeigenschaften bzw. Einwirkungen fließen auch die Modellunsicherheiten und Geometrieparameter bei der letztendlichen Bestimmung der Teilsicherheitsbeiwerte ein (FISCHER 2001). Diese kürzen sich in der von FISCHER (2001) beispielhaft durchgeführten Berechnung aber größtenteils weg. Die statistische Basis der Teilsicherheitsbeiwerte wirft, wie bei der Ermittlung der charakteristischen Werte, die Frage nach einer ausreichend abgesicherten Datenlage auf. Der Sicherheitsindex wird aus der akzeptierten Versagenswahrscheinlichkeit abgeleitet und stellt das Maß der Zuverlässigkeit dar. Er fußt auf der Kenntnis der relevanten Verteilungsgesetze und ist u.a. auch von der jeweiligen Problemstellung selbst abhängig. Im Langzeitsicherheitsnachweis erhalten die Nachweise der Barriereintegrität den Charakter eines Tragfähigkeitsnachweises, da die Sicherheitsanforderungen eines Gebrauchstauglichkeitsnachweises als nicht ausreichend angesehen werden (Kapitel 6). Außerdem stellt sich die Frage nach dem Einfluss der Lebensdauer auf den Sicherheitsindex. Der Sicherheitsindex im Eurocode wird in Verbindung mit Überwachungs- und Prüfmaßnahmen für ein Zuverlässigkeitsniveau von 95% angegeben. Die Höhe des Sicherheitsindex ist dabei an die verschiedenen Bemessungssituationen geknüpft und wird im Eurocode grundsätzlich für einen Bezugszeitraum

von einem Jahr oder 50 Jahren angegeben. Wie bereits in Kapitel 5 angesprochen, wirft dieser Aspekt der Zuverlässigkeit auf eine langzeitsichere Auslegung Probleme auf.

Der Nachweis der Zuverlässigkeit ist eine grundlegende Voraussetzung für eine sichere Auslegung eines Bauwerks im ingenieurtechnischen Sicherheitsnachweis. Er sagt aus, ob das Bauwerk die Fähigkeit besitzt, die festgelegten Anforderungen innerhalb der Lebensdauer zu erfüllen. Im Eurocode umfasst die übliche Bemessung ein Sicherheitsniveau von 95 % und somit eine akzeptierte Versagenswahrscheinlichkeit von 5 % (siehe Kapitel 4.2). Dieses Sicherheitsniveau bezieht sich allerdings dabei auf eine Nutzungsdauer des Bauwerks von 100 Jahren. Wird ein Streckenverschlussbauwerk in diesem Sinne ausgelegt, kann langfristig das Sicherheitsniveau nicht gewährleistet werden, was der Forderung der Langzeitsicherheit nach Beibehaltung des Sicherheitsniveaus während der gesamten Lebensdauer widerspricht. Wird beispielsweise eine Lebensdauer des Verschlussbauwerks von 1.000 Jahren angenommen, ergibt sich bei einer 5 %igen Versagenswahrscheinlichkeit pro 100 Jahre eine Erhöhung auf das Zehnfache¹⁹. Die Versagenswahrscheinlichkeit des Verschlussbauwerks nach 1.000 Jahren liegt damit bei ca. 40 %, woraus gefolgert werden kann, dass bei fast jeder zweiten Einwirkung ein rechnerisches Versagen eintritt. Wird bei einer Auslegungsüberprüfung das in der KTA geforderte erhöhte Sicherheitsniveau von 98% (Versagenswahrscheinlichkeit 2 %) auf 100 Jahre im ingenieurtechnischen Sicherheitsnachweis zugrunde gelegt, ergibt sich eine Versagenswahrscheinlichkeit von ca. 18 % und damit ein rechnerisches Versagen von jeder fünften Einwirkung. Beide widersprechen den Anforderungen der Langzeitsicherheit nach einem gleichbleibenden Sicherheitsstandard während der Nachbetriebsphase eines Endlagers. Würde umgekehrt ein Sicherheitsniveau von 95 % nach 1.000 Jahren angenommen werden, ergibt sich durch Rückrechnung auf 100 Jahre ein Niveau von ca. 99,5 % nach dem Ansatz im Eurocode und ca. 99,8 % nach dem Ansatz der KTA. Bereits an dieser Stelle ist anzumerken, dass ein solches Sicherheitsniveau technisch nicht umsetzbar ist. In diesem Zusammenhang wäre zu überlegen, ab dem Zeitpunkt einer nachgewiesenen angemessenen Salzgruskompektion ein noch festzulegendes verringertes Sicherheitsniveau im Langzeitsicherheitskonzept zuzulassen (kontrollierte gestaffelte Verringerung).

Im Zusammenhang mit dem anzusetzenden Sicherheitsniveau ist zu berücksichtigen, dass mit der Festlegung des Sicherheitsindex (Zuverlässigkeitsindex) der anzuwendende Teilsicherheitsbeiwert beeinflusst wird. Der Teilsicherheitsbeiwert mit seinen Berechnungsgrundlagen basiert nur auf der einfachsten Variante nach der Zuverlässigkeitstheorie, die eine Normalverteilung voraussetzt. Da die Wahl gerade dieser Verteilung nicht notwendigerweise vom Datenmaterial gestützt wird, wäre zu überlegen, wie die Wahl bei anderen Verteilungsfunktionen beeinflusst würde.

Ein weiteres Problem könnte sich bei der Handhabung der Kombinationsregeln ergeben. Treten mehrere veränderliche Einwirkungen gleichzeitig auf, werden zur Bestimmung des Bemessungswertes der Auswirkung die auftretenden Einwirkungen mit Hilfe von Kombinationsbeiwerten für eine festgelegte Referenzperiode (Nutzungsdauer) gewichtet. Dabei wird eine dominierende vollanzusetzende Einwirkung festgelegt, die restlichen Einwirkungen werden mit Kombinationsbeiwerten abgemindert (Eurocode 0). Eine Herleitung der Kombinationsbeiwerte wird in FISCHER (2001) gegeben. Bei den Berechnungen spielen neben der Annahme einer Normalverteilung, dem Sicherheitsindex und dem Wichtungsfaktor auch die Basiszeitintervalle und die relativen

¹⁹ Berechnung bei stochastischer Unabhängigkeit für ein Sicherheitsniveau von 95%: $(0,95)^{10} \approx 0,6 \rightarrow \text{Versagen: } 1-0,6 = 0,4$ entspricht 40%

Wiederholungszahlen²⁰ eine Rolle. Voraussetzung bei der Berechnung ist u.a. eine statistische Unabhängigkeit der Einwirkungsprozesse. Eine Diskussion darüber, welche der Kombinationsregeln aus dem Eurocode oder auch der erweiterten Kombinationsberechnungen aus der DAfStb-Richtlinie anzuwenden ist, würde an dieser Stelle zu weit führen. Für alle genannten Kombinationsregeln stellt sich die Frage, ob diese überhaupt für die Problematik dieser Arbeit anwendbar sind. Neben den bereits oben angesprochenen Problemen des grundsätzlichen Bezugs auf eine Normalverteilung sowie die Komplexität der gegenseitigen Beeinflussung von langzeitlichen Einwirkungen werden für die Kombinationsbeiwerte Wiederholungszahlen benötigt. Die Ermittlung von Wiederholungszahlen ist an langzeitliche statistische Auswertungen, mitunter auch an Erfahrungen, gekoppelt und steht in Beziehung zur Lebensdauer des Bauwerks. Für die langzeitlichen auftretenden Einwirkungen sind für solche Statistiken keine empirischen Daten verfügbar. Des Weiteren ist für die Kombinationsberechnung die Festlegung von einer dominierenden Einwirkung grundlegend. Abgesehen davon, dass eine dominierende veränderliche Einwirkung nicht ohne weiteres feststellbar ist und daher eine subjektive Festlegung des Bearbeiters eintreten könnte, ist es aufgrund fehlender THMC-Modellierungen derzeit noch nicht möglich, alle auftretenden Einwirkungen in ihrer annähernden Höhe zu bestimmen. Diesbezügliche überschlägige Schätzungen sind mit dem hohen Sicherheitsanspruch bei einer Endlagerung nicht vereinbar. Außerdem kann sich bei einem Streckenverschlussbauwerk in einem Endlager für hochradioaktive Abfälle die Dominanz einiger Einwirkungen während der Zeit ändern. Das bedeutet, dass aus ursprünglich dominierenden Einwirkungen im Laufe der Zeit untergeordnete Einwirkungen bzw. aus untergeordneten Einwirkungen dominierende Einwirkungen werden können. Um dieses Phänomen innerhalb einer sicheren Auslegung für solch lange Zeitspannen – wie sie für ein Streckenverschlussbauwerk in einem Endlager vorgesehen sind – zu berücksichtigen, würde eine Berechnung von kombinierten Einwirkungen für spezifische Zeitabschnitte als notwendig erscheinen lassen. Ob dies mit der derzeitigen Vorgehensweise vereinbar ist, müsste überprüft werden.

Die obenstehenden Betrachtungen zeigen, dass eine direkte Anwendung des aktuellen Eurocodes nicht dem Nachweis einer langzeitsicheren Auslegung eines untertägigen Verschlussbauwerks in einem Endlager für radioaktive Abfälle entsprechen würde. Der Grundgedanke des Eurocodes in Bezug auf die Arbeit mit Teilsicherheitsbeiwerten sollte bezüglich dieser Problematik weiter verfolgt werden. Das schließt neben den bereits angesprochenen Überlegungen über die Vorgehensart bei der Festlegung von Bemessungswerten sowie Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerten auch eine generelle Prüfung der Anwendbarkeit von vorgegebenen Werten aus einer standardisierten Norm für die Auslegung untertägiger Bauwerke ein. Gemeint ist damit, dass beispielsweise die Vereinheitlichung von Teilsicherheitsbeiwerten des Widerstandes (z.B. Scherwiderstand) möglicherweise zu Über- bzw. Unterdimensionierungen führen könnte. Die Normen beziehen sich auf die Betonbaustoffe (Beton und Stahlbeton) und deren materialeigenen Festigkeiten. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage nach der Vereinbarkeit mit den Materialeigenschaften des Sorelbetons, dessen Elastizitätsmodul sich nach MISRA & MARTHUR (2007) bereits bei der anteiligen Veränderung der einzusetzenden Grundmaterialien verändert. Des Weiteren wird sich auch die im Eurocode vorgeschriebene klare Trennung von Beanspruchung (Einwirkung) und Widerstand als schwierig erweisen, da eine strikte Unterscheidung oftmals nicht möglich ist, z.B. zwischen Druck und Scherfestigkeit (VOIGT ET AL. 2006). Zusätzlich sind Beanspruchungen und Widerstände i.d.R. THMC-gekoppelt, eine entkoppelte Betrachtung und ggf. eine Berücksichtigung der Kopplung durch passend gewählte Beiwerte müsste durch geeignete Modelle gestützt werden.

²⁰ Laut FISCHER (2001) sind für verschiedene Einwirkungstypen bei unterschiedlichen Zeitintervallen relative Wiederholungszahlen zu berücksichtigen. Diese berechnet er indem er die Referenzperiode für die Einwirkung durch das Zeitintervall dividiert.

In diesem Zusammenhang sollte auch geklärt werden, an welcher Stelle die Teilsicherheitsbeiwerte im Untertagebereich eingeführt werden sollten: bei den Ursachen der Einwirkung, bei der Berechnung der Bemessungswerte, bei den auftretenden Belastungen, bei den Schnittlasten oder aufgeteilt auf alle diese Aspekte (SIMMER 1999). Des Weiteren wirft WEIßENBACH (1998) die Frage auf, ob Mängel an der Bauausführung, nicht erkannte Gefahrenzustände und besonders die Vernachlässigung der Instandhaltung in irgendeiner Weise in die Teilsicherheitsbeiwerte mit einbezogen werden sollten.

Ob eine Verwendung der Teilsicherheitsbeiwerte auch für eine Zuverlässigkeitsaussage bei der Auslegung geotechnischer Barrieren in einem Endlager für hochradioaktive Stoffe vorteilhaft und umsetzbar ist, kann an dieser Stelle nicht geklärt werden. Die in diesem Kapitel durchgeführte kurze Betrachtung zur Anwendbarkeit bzw. Übertragbarkeit des Eurocodes bei der Bemessung untertägiger Bauwerke – wie z.B. eines Streckenverschlussbauwerks – wirft viele Fragen auf, die es noch zu beantworten gilt. Insbesondere ist eine ausreichende Datengrundlage bestimmend für eine sichere Bemessung. Mit einer probabilistischen Vorgehensweise, die auf einer sehr geringen Datenlage basiert, wird sich keine Aussage zu repräsentativen Werten treffen, sondern nur eine Bandbreite abschätzen lassen.

Einbezug von Rückhaltungsaspekten

Die in diesem Kapitel für drei Aspekte ansatzweise durchgeführten Betrachtungen zeigen, dass eine Umsetzung und ein langzeitsicherer Nachweis der Sicherungsfunktion des Bauwerks eine erhebliche Herausforderung darstellt. Es stellt sich die Frage, ob Problemen hinsichtlich der Nachweise zur primären Sicherheitsfunktion ‚Ver- bzw. Behinderung eines Lösungszutritts‘ in einem modifizierten Sicherheitskonzept auch durch einen Einbezug der Sicherheitsfunktion ‚Ver- bzw. Behinderung eines Austritts kontaminierter Lösung‘ begegnet werden kann. Würde der Fall einer erhöhten Durchlässigkeit bei noch gegebener Tragfähigkeit innerhalb der Lebensdauer des Verschlussbauwerks eintreten, bestände die Möglichkeit, sorptionsfähige Materialien in das Streckenverschlussbauwerk zu integrieren, um der Sicherheitsfunktion gerecht zu werden. Generell kann eine Sorption von Radionukliden an Zementphasen sowie eine Mischkristallbildung eine Möglichkeit zur Rückhaltung von Radionukliden bilden (SEHER & BRACKE 2012). Ein dahingehendes Prozessverständnis ist im Hinblick auf eine reaktive Stofftransportmodellierung vorhanden (METZ ET AL. 2006B / KIENZLER ET AL. 2007 / GECKEIS ET AL. 2012 / SEHER & BRACKE 2012), in seiner Auswirkung auf die Rückhaltung austretender Radionuklide jedoch noch Stand von W&T. Eine diesbezügliche Einbeziehung hätte eine modifizierte Zusammensetzung der Bauwerksmaterialien und/oder einen veränderten Aufbau des Streckenverschlussbauwerks als auch eine zusätzlich nachzuweisende primäre Sicherheitsfunktion zur Folge. In diesem Fall wäre eine Neubetrachtung der Auslegung beginnend mit einer der Anforderung entsprechenden Erweiterung bei der Identifikation langzeitlicher Einwirkungs- und Prüfaspekte unter Einbezug der in dieser Arbeit nicht untersuchten zweiten primären Sicherheitsfunktion SF ‚Ver- bzw. Behinderung eines Austritts kontaminierter Lösung‘ (Schritt 1 des Rahmenkonzeptes) erforderlich.

11 Zusammenfassende Darstellung des konzeptionellen Ablaufs und Zuordnung wesentlicher Schlussfolgerungen

In den Kapiteln 6 bis 10 werden Betrachtungen zu dem in Kapitel 5 vorgestellten Rahmenkonzept durchgeführt. In diesem Kapitel werden die methodische Vorgehensweise und die Ergebnisse für das Beispiel eines fiktiven Streckenverschlusses mit der Zielsetzung einer Vorbemessung zur Gewährleistung einer Lebensdauer von 1.000 Jahren den einzelnen Schritten des Rahmenkonzeptes zugeordnet.

Vorausgehende Festlegungen

Unter Verwendung des Sicherheitskonzepts „Sicherer Einschluss“ steht der Nachweis der primären Sicherheitsfunktion (SF) ‚**Ver- bzw. Behinderung eines Lösungszutritts**‘ und damit der primäre Funktionsindikator (FI) ‚**effektive Permeabilität**‘ im Vordergrund dieser Betrachtungen. Die primäre Sicherheitsfunktion wird durch sekundäre und tertiäre Sicherheitsfunktionen:

- SF ‚günstiges chemisches Milieu‘,
- SF ‚hohe Festigkeit des Verschlussbauwerks‘,
- SF ‚Verhinderung von Kanalisierungs- und Umläufigkeitseffekten im geotechnischen Verschlusssystem‘,
- SF ‚kohäsive Verbindung der Kontakte zwischen den Verschlussystemkomponenten‘,
- SF ‚hohe Lagesicherheit‘,
- SF ‚geringe Korrosionsrate der Bauwerksmaterialien‘,
- SF ‚geringe Metallkorrosion‘,
- SF ‚geringe Auflösungs-/ Ausfällungsrate‘

beeinflusst. Für deren Betrachtung können sekundäre und tertiäre Funktionsindikatoren wie z. B.:

- Eh- und pH-Wert,
- Spannungen,
- Drücke,
- Konvergenz,
- Rate der Inneren Korrosion,
- Permeabilitäten potentieller Schwächezonen,
- Auflösungs-/Ausfällungsrate,
- Temperatur

herangezogen werden.

Erster Schritt des Rahmenkonzeptes für die Bemessung und Nachweisführung

Es erfolgt eine separate Betrachtung der Anforderungen aus der Langzeitsicherheit und den zu prüfenden Eigenschaften für Abdichtungsbauwerke (einschließlich gesetzliche Vorgaben), um die jeweils geforderten Kriterien zu ermitteln.

Gesetzliche Vorgaben und ingenieurtechnische Anforderungen

Vorgehen:

Da keine gesetzlichen Festlegung vorliegen, aus denen sich konkrete Anforderungen an einen Streckenverschluss ableiten lassen, dienen als Ausgangspunkt für die zu prüfenden Eigenschaften der Abdichtungsbauwerke verschiedene Richtlinien und Empfehlungen der ingenieurtechnischen Bauwerksbemessung- und auslegung.

Ergebnis:

Die in dieser Arbeit als sinnvoll anwendbar erachteten Forderungen stammen aus den Empfehlungen der GDA, der DIN EN 1990ff, der DAfStb und aus dem Bereich der Untertagedeponierung und Endlagerung (Kapitel 4.2). Als Basis für die Festlegung von Prüfkriterien für die Sicherheitsbetrachtung bei Abdichtungsbauwerken dienen die Anforderungen der GDA an die zu prüfenden Eigenschaften im Hinblick auf die Dichtigkeit, Tragfähigkeit (Standicherheit), Beständigkeit und Herstellbarkeit, wobei die Prüfungsanforderungen und -nachweise aus der DIN EN 1990ff und der DAfStb-Richtlinie integriert werden.

F&E:

In den vorliegenden Richtlinien und Empfehlungen werden meist nur Anforderungen an den Inhalt geotechnischer Sicherheitsnachweise für untertägige Bauwerkskonstruktionen hinsichtlich des Nachweisziels und der erforderlichen Unterlagen definiert, nicht jedoch wie sie im Detail zu führen sind, z.B. fehlen Angaben zu einzusetzenden Berechnungsverfahren, der Methodik der Nachweisführung oder der für die Einwirkungs- und Widerstandsseite anzusetzenden Sicherheitsfaktoren. Daher wird ein Konkretisierungsbedarf hinsichtlich einer Normung oder anderer regulatorischer Vorgaben, die sich auf die Auslegung eines untertägigen geotechnischen Verschlussbauwerks beziehen, abgeleitet. Aufgrund der hier dargestellten Situation und wegen der sicherheitstechnischen Bedeutung von Abdichtbauwerken erscheint die Entwicklung einer Leitlinie zu den Anforderungen an die Bemessung und Errichtung sowie an die diesbezüglichen Nachweise angebracht.

Anforderungen aus der Langzeitsicherheit

Vorgehen:

Als Grundlage für die Ermittlung der Anforderungen aus der Langzeitsicherheit wird der FEP-Katalog (in der vorliegenden Arbeit: der Katalog des Vorhabens ISIBEL (BUHMANN ET AL. 2010A)) herangezogen. Um die langzeitlichen Anforderungen an ein Verschlussbauwerk abzuleiten, werden aus einer vorangehenden Identifikation von FEP für ein Auslegungsszenarium diejenigen FEP festgelegt, die für eine Auslegung eines Streckenverschlusses unter Einbezug der Sicherheitsfunktionen, der festgelegten Lebensdauer und im Hinblick auf das zeitliche Auftreten, die Relevanz und die entsprechenden Anforderungen für eine Vorbemessung relevant sind. Dafür werden nur FEP einbezogen, die eine hohe Eintrittswahrscheinlichkeit oder eine hohe funktionsrelevante Auswirkung sowie eine möglichst geringe Komplexität und hohe Plausibilität besitzen.

Um die identifizierten langzeitlichen Einwirkungen in der späteren Auslegung eines geotechnischen Bauwerks berücksichtigen zu können, ist die Kenntnis über den Zeitrahmen und die Art und Weise des Auftretens als auch den Ausprägungsgrad der Einwirkung von entscheidender Bedeutung. Abhängigkeiten der FEP untereinander und die Ungewissheiten über die veränderlichen Ausprägungen und das zeitliche Auftreten erschweren eine diesbezügliche Aussage. Um übergeordnete auslösende FEP zu identifizieren und damit die für eine Auslegung eines Streckenverschlusses relevanten Aspekte zu bestimmen, wird eine Kategorisierung der FEP nach ihren Abhängigkeiten durchgeführt (Kapitel 7.2). Daraus geht hervor, dass der größte Teil der Einwirkungen in ihrer Intensität von Temperaturveränderungen abhängen bzw. hervorgerufen werden.

Dieses Ergebnis erfordert eine eingehende Prüfung des zeitlichen Verlaufs der Temperaturveränderungen und des zeitlichen Auftretens der Einwirkungen, um eine konkretere Vorstellung über den Zeitrahmen zu erhalten, in denen mit Ausprägungsveränderungen der FEP-Einwirkungen gerechnet werden kann (Kapitel 7.3). Unter Verwendung der derzeitig verfügbaren Literatur können vier Phasen der Temperaturveränderung am Verschlussbauwerk infolge der wärmeentwickelnden Abfälle bestimmt werden (Temperaturanstieg bis 500 Jahre nach Einlagerung, Temperaturabfall bis zur ursprünglichen Temperatur bis ca. 11.000 Jahre nach Einlagerung, konstante ursprüngliche Temperatur von ca. 11.000 Jahren nach Einlagerung bis in ca. 70.000 Jahren, Temperaturabfall durch globale Veränderungen ab ca. 70.000 Jahren). Diese Phasenfestlegung stellt einen notwendigen Zwischenschritt zur Erweiterung der Nachweissräume dar und dient als Grundlage für eine weitergehende Klassifizierung, bei der eine Unterteilung der nächsten 200.000 Jahre in vier Zeitabschnitten (Betriebsphase, Transiente Phase, Monoton / Stationäre Phase, Zyklische Phase) erfolgt, welchen die ausgewählten FEP-Einwirkungen nach ihrem zeitlichen Auftreten zugeordnet werden. Dies ermöglicht eine Übersicht über die FEP-Einwirkungen, die gleichzeitig oder separat in den Zeitspannen auftreten. Je nach Festlegung der Lebensdauer müssen somit die für eine Auslegung relevanten Einwirkungen hinsichtlich ihrer jeweiligen Zeitspannen des Auftretens und dessen Ungewissheiten, ihrer Ausprägung und der Sicherheitsrelevanz in Abhängigkeit von der Zeit eingehender betrachtet werden. Eine Überprüfung der Interaktionsmöglichkeiten dieser FEP-Einwirkungen untereinander zeigt Intensivierungen oder Abschwächungen und damit die Höhe der einzelnen FEP-Einwirkungen auf (Kapitel 7.4). Die Kenntnis über die dadurch hervorgerufene intensivierte oder herabgesetzte bzw. aufgehobene Einwirkungsstärke ist ausschlaggebend für die Bestimmung der Widerstandskraft des Barrierebauwerks und fließt durch den Einbezug der Szenarien aus den FEP der Vorbemessung in die Sicherheitsüberprüfung im ingenieurtechnischen Planungsprozess ein. Generell zeigt sich, dass bei einseitig beeinflussenden bzw. auslösenden FEP die Interaktion und deren Auswirkung auf die Einwirkungsintensität gut nach vollzogen werden kann. Werden FEP durch mehrere FEP beeinflusst oder beeinflussen sie sich gegenseitig wird eine Kombinationsbetrachtung komplexer.

Ergebnis:

Es wird deutlich, dass die Betrachtung eines Referenzszenariums für den hier verfolgten Ansatz einer Bauwerksauslegung für die Langzeitsicherheit nicht ausreichend ist. Vielmehr muss ein Auslegungsszenarium auch FEP umfassen, die das Bauwerk stärker als im Referenzszenarium belasten, da die Funktion des Bauwerks insbesondere auch auf gerade solche Belastungssituationen gerichtet ist. Durch die Auswahlkriterien im Sinne einer Vorbemessung für ein Streckenverschlussbauwerk mit einer Lebensdauer von 1.000 Jahren können neben dem FEP „Lösungen im Grubenbau“ und dem FEP „Auflockerungszone“ 12 FEP-Einwirkungen identifiziert werden (FEP „Erdbeben“, „Konvergenz“, „hydrostatischer und hydrodynamischer Fluiddruck“, „Lösungszutritt ins Grubengebäude“, „Quellen des Betonits“, „Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien“, „Änderung des geochemischen Milieus im Grubenbau“, „Auflösung und Ausfällung“, „Inventar Metalle/Metallkorrosion“, „Wärmeproduktion“, „Thermische Expansion oder Kontraktion“, „Thermisch bedingte Spannungsänderungen im Wirtsgestein“, siehe Kapitel 7.1). Als übergeordnete FEP-Einwirkungen werden Konvergenz, Fluiddruck A und B (A = Fluiddruck durch eine einseitig vollständig anstehende Flüssigkeitssäule; B = Fluiddruck in den Porenräumen), Erdbeben, Änderung des geochemischen Milieus, Wärmeeinfluss der radioaktiven Abfälle, Nicht thermische induzierte Volumenänderung vom Materialien abgeleitet.

Für die exemplarisch für die beispielhafte Vorbemessung angenommene Lebensdauer (1.000 Jahre) sind die ersten zwei Phasen der Temperaturveränderung (Temperaturanstieg bis Maximum und beginnender Temperaturabfall) zu berücksichtigen. Die identifizierten FEP fallen zeitlich in die Abschnitte der Betriebsphase und der Transienten Phase. Bezüglich der Veränderung der Ausprägung der übergeordneten der FEP-Einwirkungen in diesen Phasen stellt sich ein komplexes

Bild von gegenseitigen Abhängigkeiten dar. Bei vielen FEP sind die Intensität und das zeitliche Auftreten noch nicht geklärt. Tritt eines dieser FEP in Interaktion mit einem anderen FEP ist eine Festlegung von Intensivierung oder Abschwächung schwierig bzw. nicht umsetzbar. Durch die fehlenden Basisdaten über das unbeeinflusste Auftreten und die Ausprägung einzelner FEP-Einwirkungen kann derzeit keine sichere Aussage über die Ausprägungsentwicklung der Einwirkungen durch einzelne oder mehrere Kombinationen getroffen werden.

F&E:

Eine Klärung bezüglich der Basisdaten über die Ausprägung einzelner (unbeeinflusster) FEP-Einwirkungen erfordert u.a. eine weitergehende Betrachtung einzelner und kombinierter Prozesse durch Modellierungen und Simulationen. Dabei sind u.a. die vorhandenen Lösungsvorkommen und die zu berücksichtigenden möglichen Lösungszutritte maßgebend für die Entwicklung des geochemischen Milieus, welches seinerseits weitere Einwirkungen in ihrer Intensität und zeitlichen Einordnung verändern kann. In diesem Zusammenhang bedarf es auch einer Klärung der Ungewissheiten seitens der Salzgruskompaktion, da diese neben der Festlegung der Lebensdauer auch im Hinblick auf die dadurch beeinflussten Veränderungen von Fluiddrücken und des chemischen Milieus auslegungsbestimmend sind. Dahingehend ist neben den Untersuchungen unter endlagerrelevanten Bedingungen zur Kompaktionsgeschwindigkeit unter Berücksichtigung von Temperatur-, Spannungs- und Feuchteverteilungen auch die Festlegung notwendig, wann der Versatz aufgrund einer hinreichenden Kompaktion als Barriere angesehen wird. Im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsbedarf auf Basis der Erkenntnisse aus der VSG werden von THOMASKE & CHARLIER (2013) diesbezüglich u.a. die Weiterentwicklung von Stoffmodellen zum Kompaktionsverhalten von Salzgrus (feucht/trocken), die Parametrisierung des Kompaktionsverhaltens von Salzgrusversatz als Funktion von Spannungszustand und der spezifischen Randbedingungen auf der Basis experimenteller Untersuchungen im Labor- und Feldmaßstab als auch die Bestimmung von Transporteigenschaften von Salzgrus und die Untersuchung der Durchlässigkeitseigenschaften nahegelegt.

Zweiter Schritt des Rahmenkonzeptes für die Bemessung und Nachweisführung

Nachdem die jeweiligen Anforderungsaspekte innerhalb der separaten Betrachtung aus der Langzeitsicherheit und den derzeitigen Regelwerken und Empfehlungstexten festgelegt wurden, erfolgt die Zusammenführung zu einer Übersicht von zu prüfenden Eigenschaften.

Vorgehen:

Durch einen Abgleich der zu prüfenden Eigenschaften an ein Abdichtungsbauwerk aus den GDA-Empfehlungen und den aus den FEP-Einwirkungen abgeleiteten Eigenschaften werden zusätzliche Anforderungen identifiziert. Damit werden die Anforderungen an die Nachsorgefreiheit und Langzeitsicherheit in die Anforderungen an die Dichtigkeit, Tragfähigkeit, Beständigkeit und Herstellbarkeit der GDA-Empfehlungen eingebracht.

In den ingenieurtechnischen Nachweisen zur Funktionalität eines geotechnischen Barrierebauwerks werden die zu prüfenden Eigenschaften mittels Kriterien und den daran gebundenen Indikatoren hinsichtlich einer langfristigen Funktionssicherheit untersucht. Im Vordergrund stehen dabei Spannungsbetrachtungen, die zu Schädigungen oder zum Verlust der Tragfähigkeit und Integrität führen können. Die chemische Stabilität bzw. die Kenntnis über auftretende Alterationsprozesse sind Voraussetzung für diese Betrachtungen. Es wird eine Überprüfung durchgeführt, inwieweit die Indikatoren zum Nachweis der Tragfähigkeit (Zugspannungen, Druck- und Schubspannungen bezüglich Bruch- und Scherfestigkeit, Verzerrungen) und der Barriereintegrität (Druck- und Schubspannungen bezüglich Dilatanz- und Scherfestigkeit, Minimalspannung,

Schädigung, Volumendehnung, Permeabilität, Durchsickerungszeit, Durchflussrate) durch langzeitliche FEP-Einwirkungen und deren Auswirkungen beeinflusst werden.

Ergebnis:

Eine genauere Betrachtung der Anforderungsnachweise an die Dichtigkeit, Tragfähigkeit und Beständigkeit am Beispiel eines Streckenverschlussbauwerks mit einer Lebensdauer von 1.000 Jahren zeigt, dass die zu prüfenden Eigenschaften und Lastfälle durch die Integration der Einwirkungen aus der Langzeitsicherheit teilweise erweitert werden müssen, grundsätzlich aber übernommen werden können. Die Erweiterungen beinhalten neben einer abweichenden Interpretation eine Diversifizierung der zu prüfenden Eigenschaften:

- Bei den Anforderungen an die Tragfähigkeit werden die bereits zu prüfenden mechanischen Lastfälle um die mechanischen Auswirkungen aus Spannungsumlagerungen erweitert.
- Bei den Anforderungen an die Beständigkeit sollten bei der Prüfung der chemischen Lastfälle neben der Zusammensetzung auch die Art der angreifenden Flüssigkeit und Dauer der Einwirkungen einbezogen werden. Bei der Prüfung der Temperaturbeständigkeit sind neben der Höhe der Temperatur aus den eingelagerten Abfällen auch die Dauer und die Veränderung der Temperatureinwirkung von Bedeutung. Die zu prüfenden hydraulischen Lastfälle der Beständigkeit können ohne Erweiterung übernommen werden.
- Bei den Anforderungen an die Dichtigkeit entfallen angesichts der in dieser Arbeit erfolgten Festlegung der primären Sicherheitsfunktion die Prüfungen zum Sorptionsverhalten. Verstärkte Prüfungen müssen hingegen zur Empfindlichkeit gegenüber Fehlstellen (mögliche Schwächezonen) im Verschlussystem stattfinden. In diesem Zusammenhang bleibt auch zu überdenken, ob die derzeit durchgeführte Mittelung aller Streckenverschluss-Systemelemente bei der Permeabilitätsbetrachtung (integrale Permeabilität), wie sie im Vordergrund des Sicherheitsnachweises aus den Betrachtungen der VSG stehen, ausreichend ist. Bei der Betrachtung langzeitlicher Einwirkungen, die durch hinzutretende wässrige Lösungen ihre Intensität verändern, ist nicht nur die Kenntnis über das Gesamtlösungsvolumen an der bei einer einseitig anstehenden Flüssigkeitssäule abgewandten Seite ausschlaggebend, sondern auch der Zeitpunkt, wann die ersten Flüssigkeitsmengen das Verschlussbauwerk durchdrungen haben, da bereits geringe Menge an zutretender wässriger Lösung Milieuveränderungen hervorrufen und eine Möglichkeit der Bildung von Kanalisierungen besteht.

Die Notwendigkeit erweiternder Betrachtungen ergibt sich neben der teilweise abweichenden Interpretation und den zusätzlich zu prüfenden Eigenschaften besonders hinsichtlich der Zeitspannen von Temperaturveränderungen aus den eingelagerten wärmeentwickelnden Abfällen, den daraus resultierenden Änderungen des geochemischen Milieus (Alteration, Korrosionserhöhung und damit Festigkeitsminderung) und die veränderten Spannungseinwirkungen. Die Höhe der Spannungseinwirkungen bestimmt sich aus der Interaktion der FEP-Einwirkungen und muss im Zusammenhang mit der durch die Alteration veränderten Festigkeit bei der Sicherheitsüberprüfung der Vorbemessung berücksichtigt werden.

Die Überprüfung der zugehörigen Indikatoren zum Nachweis der Tragfähigkeit und der Barriereintegrität zeigt, dass alle Indikatoren durch langzeitliche Einwirkungen und deren Auswirkungen beeinflusst werden. Dominierende zu berücksichtigende Beeinflussungen ergeben sich aus der Temperatur (resultierend aus den wärmeentwickelnden Abfällen), den Spannungsveränderungen, der Veränderung des Fluiddruckes (einseitig anstehende Flüssigkeitssäule und Porendruck) und des geochemischen Milieus (THMC-Prozesse).

So beeinflussen die sich wegen der Wärmeentwicklung der eingelagerten Abfälle entwickelnden zeitlich veränderlichen Temperaturfelder einerseits die Kriechparameter und führen andererseits zu

thermisch induzierten Druck- und Zugspannungen im Barriersystem. Für einen Funktionalitätsnachweis wären in diesem Zusammenhang auch die Zustandsänderungen der Bauwerksmaterialien und des umgebenden Gebirges, die Änderung der Gefügauflockerung, die Intensität der Schädigung im Gesteins- und Materialgefüge und der Kriechrate zu prüfen. Außerdem bewirkt eine Temperaturerhöhung eine Veränderung des geochemischen Milieus (z.B. Minerallösung durch Kondensationen, Erhöhung der Lösungsfähigkeit von salinaren Lösungen gegenüber einzelnen Komponenten), welches seinerseits die Alteration und somit die Festigkeit des Bauwerks und damit den Bauwerkswiderstand gegenüber Zugspannungen beeinflusst. Es ist mit einer Veränderung der Auflösungs- und Ausfällungsvorgänge und möglicherweise mit einer erhöhten Alterationsgeschwindigkeit oder mit Kanalisierungen zu rechnen. Die Löslichkeit und damit die Bauwerkskorrosion sind neben den Temperatur- und Druckverhältnissen besonders von der Ionenstärke abhängig. Damit sind die Zusammensetzung anstehender Lösung und deren Veränderung durch Umlösungsprozesse von großer Bedeutung. Durch Untersuchungen zur Änderung des geochemischen Milieus können anhand von Berechnungen und experimentellen Bestimmungen die Löslichkeit und die Alteration des verwendeten Materials bestimmt werden. Dadurch können Aussagen über eine mögliche Festigkeitsabnahme des Bauwerks und Diffusions- und Lösungsfronten getroffen werden, die notwendig sind, um bei der Bauwerksauslegung eine ausreichende Opferschicht zur Kompensation von Korrosionsprozessen einzuplanen.

Dritter Schritt des Rahmenkonzeptes für die Bemessung und Nachweisführung

Nachdem die Anforderungen an das geotechnische Bauwerk festgelegt wurden, folgt der ingenieurtechnische Planungsprozess.

Vorgehen:

Unter Einbezug des Ein- und Auswirkungsgrades langzeitlicher Einwirkungen und auf Basis geochemischer Betrachtungen erfolgt mit der Prüfung der Indikatoren im ingenieurtechnischen Sicherheit-Nachweiskonzept eine Aussage über die Funktionalität des Streckenverschlussbauwerks. In diesem Zusammenhang wird in der Vorbemessung eine erste Überprüfung bzw. Änderung der Anforderungswerte durchgeführt, um das geforderte Sicherheitsniveau während der gesamten Lebensdauer des Streckenverschlusses aufrecht zu erhalten. Um ein durchgängiges einheitlich hohes Sicherheitsniveau gewährleisten zu können, ist bei der Festlegung der Anforderungswerte darauf zu achten, dass sich die anfängliche Widerstandskraft mit der Zeit verändern wird. Unerlässlich ist auch die Kenntnis über die Stoffmodelle, da aus der Zusammensetzung der Materialien erst deren Reaktionen auf die Einwirkungen abzuleiten sind. Die geotechnische Barriere umfasst nicht nur die geotechnische Konstruktion, sondern auch das umliegende Gebirge einschließlich der Kontaktzone, der Auflockerungszone und der Übergangszone. Bei der Betrachtung einer langzeitlichen Funktionsfähigkeit sind solche Schwachstellen von großer Bedeutung. Deshalb sollte das Verhalten von Schwachstellen (Auflockerungszone, Kontaktzone, Firste, Bauwerksfugen) bereits bei der Vorbemessung einbezogen werden.

Aus der Identifizierung der FEP für eine Vorbemessung und deren eingehende Betrachtung, als auch aus den Betrachtungen von FEP-Beeinflussungen der zu prüfenden Eigenschaften und der Indikatoren geht u.a. hervor, dass:

- als dominierende Einflussgrößen die Temperatur, das geochemische Milieu und die auftretenden Spannungen zu berücksichtigen sind,
- sich die mechanischen, hydraulischen, chemischen und thermischen Einwirkungen nur chemisch und mechanisch auf den Streckenverschluss auswirken,

- sich die Intensität der langzeitlichen Einwirkungen aus deren Interaktionen ergibt und durch thermische, hydraulische, mechanische und chemische Wechselwirkungen beeinflusst wird,
- die geochemischen Ergebnisse Grundlage für aussagekräftige Spannungsberechnungen sind.

Um diese Schlussfolgerung und somit einfache langzeitbezogene Abhängigkeiten und Kombinationen bei der Vorbemessung und damit auch bei der Prüfung und Ermittlung materialspezifischer Anforderungswerte einzubeziehen, wird für die Vorbemessung eine Methode zur Vorgehensweise vorgestellt. Dabei wird sich auf die derzeitige Datenlage für ein in Gorleben geplanten Streckenverschluss gestützt (Kapitel 9). Bei der vorgeschlagenen Methode werden die Interaktionen so weit wie möglich vereinfacht und die Auswirkungen in separaten aufeinanderfolgenden Temperatur-, Geochemie- und Spannungsberechnungen jeweils für den gesamten Funktionszeitraum unter Einbezug der vorangegangenen Ergebnisse geprüft. Die Ergebnisse aus den Temperaturberechnungen werden den Temperaturphasen (Zeitpunkt der beginnenden Wärmeentwicklung im Nahfeld des Einlagerungsbereiches, erste messbare Temperaturveränderung am Streckenverschlussbauwerk, maximale Temperatur, Eintritt der ursprünglichen Umgebungstemperatur) zugeordnet. Diese Ergebnisse dienen als Grundlage für die Berechnungen des geochemischen Milieus und der Alteration des Bauwerks. Innerhalb der Betrachtungen dieses Vorbemessungsaspekts sollte gezeigt werden, inwieweit salinare Lösungen den Korrosionsfortschritt und die Alteration des Verschlussmaterials (modifizierter Sorelbeton) hervorrufen und welche Änderungen hinsichtlich der Dichtigkeit und des Festigkeitsverlustes (mechanische Widerstandsfähigkeit) des Bauwerks zu den einzelnen Zeitpunkten der Temperaturveränderungen aus den eingelagerten Abfällen zu erwarten sind. Die Zusammensetzung und damit verbundene Änderungen der Reaktivität über die Zeit würden grundsätzlich quantitative Rückschlüsse auf das Voranschreiten und das Ausmaß der Alteration des Verschlussbauwerks zulassen, die Grundlage für die Betrachtung von Spannungseinwirkungen sind. Darauf aufbauend können die Berechnungen über die Spannungseinwirkungen unter veränderten Materialbedingungen durchgeführt werden. Die Überprüfung der Anforderungswerte beruht auf den Materialparametern, die den Widerstand (Festigkeit) des Bauwerks und Gesteins beschreiben sowie der Höhe der Einwirkung (Spannung). Die jeweiligen Spannungskriterien gelten als erfüllt, wenn die auftretenden Spannungen unterhalb des Anforderungswertes, der sich durch die Verringerung der Festigkeit infolge der Alteration verändert, liegen.

Liegen die Ergebnisse zu diesen drei Vorbemessungsaspekten vor, werden die daraus hervorgehenden Anforderungswerte im Rahmen der Vorbemessung unter vorläufigen und vereinfachten Annahmen überschlägig geprüft und anschließend im Zuge der Endbemessung unter gekoppelten Prozessbetrachtungen im ingenieurtechnischen Sicherheitsnachweis verifiziert. Wird im ingenieurtechnischen Sicherheitsnachweis festgestellt, dass ein Anforderungswert nicht eingehalten wird, muss die ursprüngliche Auslegung geändert werden. Eine Absicherung der Zuverlässigkeit der Bauwerksfunktion erfolgt über eines von zwei Sicherheitskonzepten (globales Sicherheitskonzept oder Teilsicherheitskonzept).

Ergebnis:

Vorbemessungsaspekt Temperaturveränderung am Streckenverschluss:

Mit den vorliegenden Daten aus den Betrachtungen der VSG kann eine Einordnung in die vier empfohlenen zu berücksichtigen Temperaturzeitpunkte am Streckenverschluss (Zeitpunkte der beginnenden Wärmeentwicklung im Nahfeld des Einlagerungsbereiches, der ersten messbaren Temperaturveränderung am Streckenverschlussbauwerk, der maximalen Temperatur, des Eintritts der ursprünglichen Umgebungstemperatur) bis auf die letzte Temperaturentwicklungsphase vollständig durchgeführt werden (Kapitel 9.1)

Vorbemessungsaspekt Veränderung des geochemischen Milieus und Alteration des Bauwerks:

Die Datenlage über die Veränderung des geochemischen Milieus und Alteration des Bauwerks gestaltet sich für die verfolgte Intention als unzureichend.

Der in den Planungen für den Streckenverschluss in Gorleben vorgesehene Baustoff ist ein modifizierter Sorelbeton, dessen Ausgangsstoffe aus Magnesiumoxid (MgO), Steinsalz (NaCl) und gesättigter Magnesiumlösung (MgCl_2) bestehen. Die Festigkeit des Mg-Bindemittelsystems wird durch die ausgebildeten Oxichloride der Sorelphasen ($x\text{MgO} \cdot x\text{MgCl}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) hervorgerufen. Angestrebt wird dabei die als thermodynamisch stabil angesehene Sorelphase 3-1-8. Die Langzeitbeständigkeit von Sorelbeton wird im Wesentlichen durch die Korrosion der Oxichloride und der auftretenden Lösungszusammensetzung bestimmt. Dabei spielen die pH-Werte in den Lösungen vor, während und nach Reaktion mit Sorelbeton eine wichtige Rolle, da sich die Stabilitätsfelder der Phasen bei Änderungen der H^+ -Ionenaktivität in der Lösung verschieben. Die durch die Literatur verfügbaren rechnerisch und experimentell ermittelten Ergebnisse zeigen eine Stabilität der Oxichloride der 3-1-8 Phasen gegenüber MgCl_2 -reicher Lösung (salzstockintern), wohingegen bei einer MgCl_2 -armen Konzentration eine Veränderung eintritt, bei der sich die 3-1-8 Oxichloride unter Bildung von Brucit in 5-1-8 Oxichloride umsetzen (salzstockextern). Diese Auflösungs- und Umlösungsreaktionen der Mineralphasen des Bindemittels in der Sorelbetonstruktur können eine Volumenabnahme innerhalb der Bauwerksstruktur bedingen, wodurch eine Veränderung der Porosität-Permeabilität des Baukörpers und dessen Kontaktzone eintritt. Dies impliziert möglicherweise eine Herabsetzung der Dichtigkeit und eine Schwächung der Tragfähigkeit bzw. Verlust der Widerstandsfähigkeit. Nach der derzeitigen geochemischen Datenlage ist die Verwendung des für den Streckenverschluss eingesetzten Materials (Sorelbeton 3-1-8) hinsichtlich langzeitlicher Betrachtungen nach dem Stand von Wissenschaft und Technik für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in Frage zu stellen bzw. einer Alternativenprüfung zu unterziehen, obwohl der Baustoff sonst vorteilhafte Eigenschaften aufweist (z.B. Elastizität, Verarbeitung). Derzeitige diesbezüglich kompensierende konstruktive Lösungen sind für einen Langzeitsicherheitsnachweis nach derzeitigem Kenntnisstand nicht ausreichend. Aufgrund der derzeit unzureichenden vorhandenen geochemischen Daten (u.a. Kinetik) kann eine Vorbemessung bereits innerhalb des Vorbemessungsaspekts *Veränderung des geochemischen Milieus und Alteration des Bauwerks* nicht abschließend durchgeführt werden.

Vorbemessungsaspekt Spannungseinwirkungen unter veränderten Materialeigenschaften:

Aufgrund dessen, dass zu große Datenlücken innerhalb des Vorbemessungsaspekts *Veränderung des geochemischen Milieus und Alteration des Bauwerks* auftreten und die Kopplungen zwischen der Entwicklung des chemischen Milieus (Alteration) und den mechanischen und hydraulischen Betrachtungen ausschlaggebend für eine ausreichend belegte Ergebnisaussage sind, ist eine weiterführende Betrachtung des Vorbemessungsaspektes *Spannungseinwirkungen unter veränderten Materialeigenschaften* nicht zielführend. Es besteht zunächst die Notwendigkeit einer Weiterentwicklung von realitätsnahen Modellierungswerkzeugen und -strategien als auch experimentellen Untersuchungen zur Absicherung der chemischen und mechanischen Prozesse in der Kontakt- und Auflockerungszone und der Langzeitstabilität der Baustoffe unter dem Aspekt der THMC-Einwirkungen. Darauf aufbauend kann eine material- und einwirkungsspezifische Anforderungswertableitung erfolgen. Grundsätzliche Voraussetzungen für Modellierungen sind u.a. ein ausreichender Betrachtungsausschnitt sowie die Kenntnis von Materialkennwerten, Fluidzusammensetzungen und vom Endlagerkonzept (Aufbau, Einlagerungsinventar). Danach kann die Auslegung im Sicherheitsnachweis geprüft und ggf. verbessert werden (Iteration).

Auslegung:

Da sich eine zunehmende Tendenz zur Anwendung des Teilsicherheitskonzepts zeigt, wird in der Arbeit die Verwendung des Teilsicherheitskonzeptes (Methode der Grenzzustände), wie sie im

Eurocode vorgeschlagen wird, diskutiert. Kiefer (1997) weist darauf hin, dass die Dichtigkeitsnachweise für ein geotechnisches Barrierebauwerk für ein Endlager für radioaktive Abfälle nicht den Gebrauchstauglichkeitsnachweisen zugeordnet werden, sondern hinsichtlich des Zuverlässigkeitsniveaus den Charakter eines Tragfähigkeitsnachweises erhalten. Aus den durchgeführten Betrachtungen zum Eurocode zeigt sich aber, dass sich eine Anwendungsübertragung für untertägige Bauwerke in einem Endlager mit Hinblick auf eine erheblich längere Lebensdauer besonders aufgrund der eingeschränkten Datenlage als schwierig gestalten wird (Kapitel 10). Dies wirkt sich bei der Festlegung von notwendigen Werten, wie z.B. Bemessungs- und Teilsicherheitsbeiwerte einschließlich ihrer Herleitung aus verschiedenen Verteilungsfunktionen aus. Zudem sollte vor einer Anwendung die Anwendbarkeit von vorgegebenen Werten aus einer standardisierten Norm für die Auslegung untertägiger Bauwerke geprüft werden. Des Weiteren wird sich der Nachweis eines durchgängigen Sicherheitsniveaus als problematisch erweisen. Für eine mögliche Anwendung wurden dennoch die FEP-Einwirkungen hinsichtlich der Bemessungssituationen betrachtet (Kapitel 7). Dabei zeigt sich, dass die für eine Vorbemessung ausgewählten FEP-Einwirkungen auf einen Streckenverschluss mit einer Lebensdauer von 1.000 Jahren zeitvariabel sind und weitestgehend statisch auf das Bauwerk einwirken. Ihr Auftreten und ihre Intensität sind jedoch von auslösenden Faktoren und Interaktionen abhängig, wobei sich die Dominanz einiger Einwirkungen während der Zeit ändern kann und dadurch aus ursprünglich dominierenden Einwirkungen bzw. aus untergeordneten Einwirkungen im Laufe der Zeit untergeordnete Einwirkungen bzw. dominierende Einwirkungen werden können, was hinsichtlich einer Vereinbarkeit mit den Kombinationsregeln (rechnerische Bestimmung von Auswirkungen von Einwirkungskombinationen) nach dem Eurocode geprüft werden muss.

F&E

Die Kenntnis über den Ablauf von chemischen Reaktionen oder Phasenübergängen im Baustoff, während er im Kontakt mit möglich auftretenden Lösungen steht, ist für eine langzeitsichere Auslegung unumgänglich, um langzeitliche Systemveränderungen zu verstehen. Es zeigt sich, dass umfassendere Kenntnisse zur langfristigen Entwicklung des geochemischen Milieus (Festigkeitsveränderung) unter Einbezug der Temperaturentwicklung und der ggf. zutretenden Lösungsvolumina erforderlich sind, um eine diesbezügliche Aussage treffen zu können (z.B. Reaktionen von metastabilen Phasen, Reaktionsgeschwindigkeiten der Baumaterialien und salinaren Lösungen, Einbezug von Ionen- und Temperaturabhängigkeit). Da nicht eindeutig vorhergesagt werden kann, welche Zusammensetzung am Bauwerk anzutreffende Lösungen im Detail besitzen, sollten für die Fortführung des Vorbemessungsmodells bspw. die bislang durchgeführten thermodynamische Untersuchungen auf Lösungen mit unterschiedlichem Mg-Gehalt umfassender erweitert werden und insbesondere Aussagen zur Kinetik der Reaktionen unter endlagerrelevanten Bedingungen erfolgen, da die Verfügbarkeit und Zusammensetzung der Lösungen im Zusammenhang mit den Temperaturveränderungen die Auf- und Umlösungsgeschwindigkeit und somit auch die Geschwindigkeit einer dadurch hervorgerufenen Permeabilitätssteigerung und eine möglichen Festigkeitsveränderung des Baustoffs oder Kanalisierungen im Baustoff, der Kontaktzone oder Auflockerungszone bestimmt. Im Hinblick auf die in der Arbeit ermittelten Erkenntnisse wäre es von Vorteil, parallel zu den Untersuchungen am derzeit favorisierten Baustoff mit der Forschung nach lösungsresistenteren neuen Baustoffen oder modifizierten Oxichloridzementen zu beginnen. Auch innerhalb der VSG (THOMASKE & CHARLIER (2013) / MÜLLER-HOEPPE ET AL. 2012B) wird ein Forschungs- und Entwicklungsbedarf im Bereich der chemischen Entwicklungsprozesse gesehen. Diese umfasst die Untersuchung der langfristigen Beständigkeit von Verschlussbauwerken im salinaren Milieu u.a. im Hinblick auf die Alteration der verwendeten Baustoffe einschließlich der standortspezifischen Ermittlung der chemischen Parameter, wie z.B. Beeinflussung durch andere Fremdmaterialien und das erhöhte Lösungspotential erwärmter Salzlösungen. Besonders das geochemische Verhalten von Kontaktzonen ist

versuchstechnisch nicht untersetzt, wodurch mögliche lokalisiert auftretende Korrosionsfortschritte nicht ausgeschlossen werden können (MÜLLER-HOEPPE ET AL. 2012B). Solche Korrosionsfortschritte hätten Einfluss auf die mechanischen und hydraulischen Eigenschaften dieser Bereiche, die als Schwächezonen einer besonderen Beachtung unterliegen sollten. MÜLLER-HOEPPE ET AL. (2012B) vermerkt, dass derzeit weder geeignete Modellierungskonzepte zur Behandlung von Kontaktzonen unter dem Aspekt ausgewählter mechanischer Einwirkungen (Zwangsspannungen, Zwangsverformungen) sowie hydraulischer, thermischer und chemischer Einwirkungen verfügbar sind noch die Stoffmodellbeschreibungen der Dichteelemente aus Sorelbeton, die zeitlich veränderlichen und deutlich erhöhten Gas und Lösungsdruck ausgesetzt sind, für fluidmechanische gekoppelten Berechnungen als ausreichend angesehen werden. THOMASKE & CHARLIER (2013) weisen diesbezüglich u.a. einen Forschungs- und Entwicklungsbedarf im Hinblick auf entsprechende Modellierungskonzepte und die Entwicklung eines Versuchskonzeptes zur laborativen Ermittlung hydraulischer und chemischer Eigenschaften von Kontaktzonen zwischen unterschiedlichen Baustoffen sowie zwischen Salzkontur und Dichteelemente aus.

Des Weiteren ist die Entwicklung der hydraulischen Parameter des Dichteelements an den Fortschritt der Salzgruskompaktion gekoppelt. Die Untersuchung hydromechanischer Effekte unter endlagerrelevanten Bedingungen wie Rissbildungen und -vernetzungen (u.U. von bereits geschädigten Materialien und Gesteinsbereichen) wären daher sinnvoll. Die hydraulischen Eigenschaften von Salzgrusversetzten Strecken und Verschlussbauwerken und die zeitliche Entwicklung der Transporteigenschaften von Salzgrus, Verschlussbauwerk, Auflockerungszone und Kontaktzone im Hinblick auf den Stofftransport für Gase und Flüssigkeiten sind daher eingehender zu prüfen (THOMASKE & CHARLIER 2013). Dahingehend ist auch ein besseres Prozessverständnis zur Verheilung und Permeabilitätsentwicklung in der Auflockerungszone notwendig (GRS & PTKA-WTE 2011 / MÜLLER-HOEPPE ET AL. 2012B).

Bezüglich der Absicherung der Zuverlässigkeit der Bauwerksfunktion mittels des globalen Sicherheitskonzeptes bzw. des Teilsicherheitskonzeptes muss deren Anwendung geprüft werden. Das beinhaltet eine genaue Überprüfung der Anwendbarkeit des Eurocode bzw. eine Erstellung einer neuen Norm für untertägige Bauwerke.

Vierter Schritt des Rahmenkonzeptes für die Bemessung und Nachweisführung

Nachdem der ingenieurtechnische Sicherheitsnachweis geführt wurde, erfolgt eine erweiterte Funktionsprüfung aus der ggf. Formulierungen von Anforderungen zur Nachbesserung hervorgehen (zweiter Iterationskreislauf).

Vorgehen:

Bei der erweiterten Funktionsprüfung und -bewertung werden die in Schritt 1 subjektiv ausgewählten maßgebenden langfristig möglichen FEP-Enwirkungen einschließlich ihrer Szenarien in der erweiterten Funktionsprüfung und -bewertung unter Einbezug aller FEP für ein Verschlussbauwerk (Auslegungsszenarium) und deren Auswirkungen, Beeinflussungen, Interaktionen und Unsicherheiten innerhalb einer Szenarienanalyse und ggf. mit Hilfe von Modellierungen und Simulationen betrachtet und das ausgelegte Bauwerk auf die Gewährleistung der dem Sicherheitskonzept entsprechenden Sicherheitsfunktionen innerhalb der festgelegten Lebensdauer des Bauwerks geprüft und im Zusammenhang mit dem Gesamtsystem (Mehrbarriersystem) bewertet. Werden an dieser Stelle Anforderungen zur Nachbesserung formuliert, werden diese iterativ in Schritt 3 eingearbeitet und die Sicherheitsnachweise in Schritt 3 erneut durchgeführt.

Fünfter Schritt des Rahmenkonzeptes für die Bemessung und Nachweisführung

Der fünfte Schritt beinhaltet die Dokumentation.

Vorgehen:

Entsprechen die Ergebnisse nicht den Sicherheitsanforderungen, setzen weitere Iterationskreisläufe ein bis entweder festgestellt wird, dass ein Sicherheitsnachweis nicht mehr zuverlässig geführt werden kann (Änderung des Endlagerkonzeptes) oder die Ergebnisse der erweiterten Funktionsprüfung und -bewertung den festgelegten Sicherheitsanforderungen entsprechen und im fünften Schritt eine nachvollziehbare Sicherheitsdokumentation erfolgt.

12 Zusammenfassung und Ausblick

Das in Deutschland favorisierte Entsorgungskonzept für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle umfasst die Isolation der Abfälle von der Biosphäre durch deren Einschluss in tiefen geologischen Formationen. Das oberste verfolgte Schutzziel ist, den Schutz des Menschen und der Umwelt mit Hilfe eines Mehrbarrierensystems dauerhaft sicherzustellen. Für das in Deutschland derzeit verfolgte Sicherheitskonzept für eine Endlagerung im Steinsalz sind geotechnische Barrierebauwerke besonders in der frühen Nachbetriebsphase eine wichtige Komponente zur Gewährleistung des Sicherheitsanspruches. Die derzeitig vorhandenen normativen und regulatorischen Ansätze des Bauwesens zielen auf einen Nachweis der Sicherheit von übertägigen und oberflächennahen Bauwerken über maximal 100 Jahre ab. Zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit wird gegenwärtig aber eine Funktionalität untertägiger Verschlussbauwerke von mehreren 1.000 oder 10.000 Jahren gefordert. Da die geotechnischen Verschlussbauwerke das Eindringen von Lösungen in den Einlagerungsbereich bzw. ein späteres Austreten möglicherweise kontaminierter Lösungen aus dem Grubenbereich über verschiedene Pfade in die Biosphäre während der Salzgruskompression ver- bzw. behindern sollen, wird ein Barriereverhalten angestrebt, das auch unter langzeitlichen Lastbedingungen (Einwirkungen) die geforderte Funktionalität erfüllt. Dabei müssen die untertägigen Konstruktionen während ihrer gesamten Lebensdauer eine Tragfähigkeit gegen den Gebirgsdruck und/oder bei einer einseitig anstehenden Flüssigkeitssäule, eine Dichtigkeit gegenüber Fluiden, eine Langzeitstabilität der Materialien gegenüber korrosiven Lösungen oder Gasen sowie eine thermische Stabilität der Materialien gewährleisten. Zur Klärung der Frage, ob die derzeitige ingenieurtechnische normative und regulatorische Auslegungsmethodik für ein geotechnisches Verschlussbauwerk in einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle im Hinblick auf erheblich längere Nutzungszeiten unverändert übernommen werden kann bzw. wo Änderungs- bzw. Ergänzungsbedarf besteht, wurde ein Konzeptansatz entwickelt, der die langzeitsicherheitsrelevanten Anforderungen in die derzeitigen ingenieurtechnischen Vorgaben integriert.

Das Konzept gliedert sich in fünf Vorgehensschritte:

- Schritt 1: Separate Betrachtung der Anforderungen aus dem Sicherheitskonzept für die Langzeitsicherheit und der ingenieurtechnischen Vorgaben aus den normativen Regelwerken an eine Auslegung für ein geotechnisches Abdichtungsbauwerk. Dadurch werden die FEP-Einwirkungen, die die Anforderungen an eine langzeitsichere Bauwerksauslegung definieren, und die zu prüfenden Eigenschaften für das jeweilige geotechnische Bauwerk identifiziert. Je nach Zielsetzung (Vorbemessung und Bemessung) erfolgt eine Auswahl der langfristig einzubeziehenden Aspekte hinsichtlich Zeit, Relevanz und entsprechend der Anforderungen.
- Schritt 2: Abgleich der Anforderungen aus der Langzeitsicherheit an ein geotechnisches Barrierebauwerk mit den ingenieurtechnischen Vorgaben an die Auslegung von Abdichtungsbauwerken auf der Basis ausgewählter relevanter FEP für eine Vorbemessung bzw. Bemessung aus den in Schritt 1 identifizierten FEP-Einwirkungen. Durch die Einschätzungen möglicher weitreichender Einwirkungen und Auswirkungen werden ggf. zusätzliche Anforderungen und Nachweiskriterien abgeleitet.
- Schritt 3: Ingenieurtechnische Planung des Verschlussbauwerks, in der die Auslegung mit der Prüfung der festgelegten Anforderungswerte im ingenieurtechnischen Sicherheitsnachweis erfolgt.

- Schritt 4: Erweiterte Funktionsprüfung und -bewertung unter Einbezug aller in Schritt 1 identifizierten FEP, der daraus resultierenden Szenarien und der Betrachtung des Verschlussbauwerks im Gesamtsystem (Mehrbarrierensystem). Daraus werden Aussagen über den Nachweis der Langzeitsicherheit und ggf. Formulierungen von Anforderungen zur Nachbesserung der Auslegung abgeleitet.
- Schritt 5: Sicherheitsdokumentation der erzielten Ergebnisse und Nachweise als Grundlagendokument für das Planfeststellungs- bzw. Genehmigungsverfahren.

Das Konzept basiert darauf, die unterschiedlichen ausschlaggebenden Kriterien aus dem Bauwesen und der Langzeitsicherheit vor der Auslegung zusammenzuführen, wodurch die Vorgaben an die zu prüfenden Eigenschaften eines langfristig funktionstüchtigen Verschlussbauwerks festgelegt werden. Darauf aufbauend werden mit Hilfe von diversen Iterationen zwischen den einzelnen Schritten der konzeptionelle Aufbau und die Anforderungswerte hinsichtlich der Einhaltung der Grenzwerte aus den Anforderungen der Langzeitsicherheit geprüft bzw. ermittelt, wodurch sich Schritt für Schritt der optimalen Auslegung angenähert wird.

Das vorgestellte Rahmenkonzept für die Bemessung und Nachweisführung wird am Beispiel eines Streckenverschlusses anhand der Zielsetzung einer Vorbemessung erläutert. Im Vordergrund stehen dabei die Ableitung langzeitlicher Einwirkungen und die Identifizierung zusätzlicher Anforderungen an bereits bestehende regulatorische Nachweiskriterien. An einigen Stellen wurde auf die Endlagerkonzeption und die Datenbasis aus den Betrachtungen der VSG zurückgegriffen. Die beispielhafte Betrachtung wurde u.a. aufgrund der derzeit eingeschränkten Datenlage nur bis zum Schritt 3 durchgeführt werden.

Obwohl die beispielhafte Betrachtung nicht abgeschlossen werden konnte, lässt sich zusammenfassend feststellen, dass mit der vorgestellten methodischen Vorgehensweise eine langzeitsichere Auslegung eines Streckenverschlusses mit einer Lebensdauer von 1.000 Jahren möglich ist. Voraussetzung dafür sind die beschriebenen Veränderungen hinsichtlich der GDA-Anforderungen und der zu prüfenden Indikatoren als auch die Berücksichtigung der Einflüsse der durch die Wärme abgebenden Abfälle hervorgerufenen Temperaturveränderungen und der daraus resultierenden Veränderungen des geochemischen Milieus auf die Einwirkungsintensität und die Widerstandskraft (Festigkeit) des Bauwerks. Es zeigt sich, dass bereits bei einer Vorbemessung vereinfachte Wechselbeziehungen zwischen den aus den Temperaturveränderungen resultierenden Änderungen der Einwirkungsausprägung und des geochemischen Milieus (Alteration und somit Festigkeitsverminderung) einbezogen werden sollten. Die veränderte Festigkeit kann im Zusammenhang mit der aus den Interaktionen der FEP-Einwirkungen bestimmte Höhe der Spannungseinwirkungen bei der Sicherheitsüberprüfung realitätsnäher einbezogen werden. Der zeitliche Verlauf der Festigkeitsverminderung infolge der chemischen und mechanischen Einwirkungen beschreibt die langzeitliche Veränderung der Anforderungswerte und ist somit neben der Höhe der Einwirkungen für die Gewährleistung der primären Sicherheitsfunktion „Ver- und Behinderung eines Lösungszutrittes“ und des zugehörigen Funktionsindikators „effektive Permeabilität“ bestimmend. Inwieweit neue Aspekte bzw. FEP durch neue Erkenntnisse in die FEP-Auswahl einfließen und die in dieser Arbeit vernachlässigten Aspekte, wie z.B. die Kanalisierungseffekte im Dichteelement (Innere Korrosion), die Einflüsse aus der Gasentwicklung (z.B. durch Metallkorrosion) oder Erdbeben die Festlegung der Anforderungswerte bzw. die gesamte Bemessung des Bauwerks beeinflussen, muss in weitergehenden Untersuchungen betrachtet werden.

Die Umsetzung und dahingehende Sicherheitsnachweise einer langzeitsicheren Auslegung über mehrere 1.000 Jahre auf der Grundlage abgesicherter realitätsnaher labortechnischer und modellierungsbasierter Ergebnisse wird noch eine große Herausforderung darstellen. Dahingehend wäre eine detaillierte Empfehlung für eine Auslegung untertägiger Bauwerke für ein HLW-Endlager hilfreich, in der eine ingenieurtechnische Vorgehensweise, Prüf Aspekte und zu beachtende numerische Werte (Materialgrenzwerte, Sicherheitsbeiwerte, usw.) dargestellt werden. Zwar werden Anforderungen an den Inhalt geotechnischer Sicherheitsnachweise für untertägige Bauwerkskonstruktionen hinsichtlich des Nachweisziels und der erforderlichen Unterlagen definiert, nicht jedoch wie die Nachweise im Detail zu führen sind, z.B. fehlen Angaben zu einzusetzenden Berechnungsverfahren, der Methodik der Nachweisführung oder der für die Einwirkungs- und Widerstandsseite anzusetzenden Sicherheitsfaktoren.

Neben dem F&E-Bedarf aus den Betrachtungen der VSG (Thomauske & Charlier 2013) lassen sich aus den Betrachtungen dieser Arbeit folgende für die Auslegung von Verschlussbauwerken relevante Themenbereiche als notwendiger Forschungs- und Entwicklungsbedarf ableiten:

- Grundlagenforschung über Ausprägungen von FEP-Einwirkungen
 - Ausprägungen von FEP-Einwirkungen bei unbeeinflusstem Auftreten und kombiniertem Auftreten u.a. weitergehende Betrachtung einzelner und kombinierter Prozesse durch Modellierungen und Simulationen sowie ggf. Laboruntersuchungen
 - Untersuchungen insbesondere zur Änderung des geochemischen Milieus mit Rückschluss auf die Alteration des Bauwerks unter Berücksichtigung von Lösungsvorkommen und möglichen Lösungszutritten
 - Ausprägungsveränderung von veränderlichen Einwirkungen
- Klärung der Ungewissheiten hinsichtlich der Salzgruskompektion
 - Untersuchungen unter endlagerrelevanten Bedingungen zur Kompaktionsgeschwindigkeit unter Berücksichtigung von Temperatur-, Spannungs- und Feuchteverteilungen
 - Festlegung des Zeitpunktes, wann der Versatz als Barriere angesehen wird
- F&E in Zusammenhang mit der Zusammensetzung am Bauwerk/Baustoff anzutreffender bzw. zu erwartender Lösungen
 - Erweiterte Untersuchungen bezüglich der Reaktion des Baustoffes auf Lösungen mit unterschiedlichen Mg-Gehalt, einschließlich Aussagen zur Kinetik unter endlagerrelevanten Bedingungen
 - Forschung nach lösungsresistenteren neuen Baustoffen und/oder modifizierten Oxichloridzementen
 - Forschung zur Verbesserung der Kenntnisse zum geochemischen Verhalten von Kontaktzonen (lokalisiert auftretende Korrosionsfortschritte, Laboruntersuchungen und Modellierungskonzepte für THMC-veränderte Einwirkungen)
 - Porosität-/Permeabilitätsbeziehung der ALZ
- Konzeptionelle Überlegungen zu einer kontrollierten gestaffelten Verringerung der Anforderungen an das Sicherheitsniveau (derzeit 95 %) unter Berücksichtigung der fortschreitenden Salzgruskompektion, um ab dem Zeitpunkt einer nachgewiesenen

angemessenen Salzgruskompaktion, ein noch festzulegendes verringertes Sicherheitsniveau im Langzeitsicherheitskonzept zuzulassen (kontrollierte gestaffelte Verringerung).

- Anwendung des Grundgedankens im Eurocode
 - Prüfung der Anwendbarkeit von vorgegebenen Werten
 - Erweiterung der Datenbasis zur Ableitung von Verteilungsfunktionen bzw. Berechnung von charakteristischen Werten, Teilsicherheitsbeiwerten und Bemessungswerten (u.a. Beeinflussung der Werte bei unterschiedlichen Verteilungsfunktionen)
 - Prüfung der Anwendbarkeit der Kombinationsberechnung bei einer Änderung von ursprünglichen dominierenden/untergeordneten Einwirkungen ins jeweilige Gegenstück.

Literatur

- ABBERGV (2012): Bergverordnung für alle bergbaulichen Bereiche (Allgemeine Bundesbergverordnung - ABBERGV); Ausfertigungsdatum: 23.10.1995 (BGBl. I S. 1466), letzte Änderung durch Artikel 5 Absatz 5 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212).
- AKEND (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte; Empfehlungen des AkEnd - Arbeitskreis Auswahlverfahren, W & S Druck GmbH, Köln Dezember 2002.
- ALAND, H.-J., HANDKE, N., LEUSCHNER, J., BODENSTEIN, J., MAELZER, K., SITZ, P., GRUNER, M. UND SPRINGER, H. (1999): Langzeitfunktionstüchtiger Streckenverschluss aus kompaktiertem Bentonit im Bergwerk Sondershausen; *Kali und Steinsalz* 12 (1999) Nr. 9, S. 24 - 29 und *Geotechnik* 22 (1999) Nr. 1, S. 56 - 62.
- ANDRA (2005): Sicherheits- und Machbarkeitsstudie Dossier 2005 Argile Report Series:
- Synthesis Argile: Evaluation of a geological repository in an argillaceous formation
 - Tome Architecture and management of a geological repository
 - Tome Phenomenological evolution of a geological repository
 - Tome Safety evaluation of a geological repository.
- ATG (2012): Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz); Ausfertigungsdatum: 23.12.1959, Neugefasst durch Bek. v. 15.7.1985 I 1565, letzte Änderung durch Artikel 5 Absatz 6 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212).
- ATSTRLSV (1990): Verordnung über die Gewährleistung von Atomsicherheit und Strahlenschutz (AtStrlSV); Ausfertigungsdatum: 11.10.1984 (GBl. DDR 1984 I S. 341), Textnachweis Geltung ab: 3.10.1990 durch das im beigetretenen Gebiet fortgeltendes Recht der ehem. Deutschen Demokratischen Republik gem. Anlage II Kap. XII Abschn. III Nr. 2 nach Maßgabe d. Art. 9 EinigVtr v. 31.8.1990 iVm Art. 1 G v. 23.9.1990 II 885, 1226 mWv 3.10.1990.
- ATVfV (2006): Verordnung über das Verfahren bei der Genehmigung von Anlagen nach § 7 des Atomgesetzes (Atomrechtliche Verfahrensverordnung - ATVfV); vom 18. Februar 1977, Neugefasst durch BGBl. I 1995, Nr. 8, S. 180, letzte Änderung durch Artikel 4 des Gesetzes vom 9. Dezember 2006 (BGBl. I 2006, Nr. 58, S. 2819).
- BA, H. UND GUAN, H. (2009): Influence of MgO/MgCl₂ molar ratio on phase stability of magnesium oxychloride cement; *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 24: 476–481.
- BBERG (2009): Bundesberggesetz (BBergG); Ausfertigungsdatum: 13.08.1980 (BGBl. I S. 1310), letzte Änderung durch Artikel 15a des Gesetzes vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585).
- BECKER, D.-A., BUHMANN, D., MÖNIG, J., NOSECK, U., RÜBEL, A. UND SPIEß, S. (2009): Endlager Morsleben – Sicherheitsanalyse für das verfüllte und verschlossene Endlager mit dem Programmpaket EMOS; Verfahrensunterlage Nr. P 278, Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben.

- BEUTH, T., BRACKE, G., BUHMANN, D., DRESBACH, C., KELLER, S., KRONE, J., LOMMERZHEIM, A., MÖNIG, J., MRUGALLA, S., RÜBEL, A. UND WOLF, J. (2012): Szenarienentwicklung: Methodik und Anwendung; VSG-Abschlussbericht AP 8, FuE-Vorhaben UM10A03200, Kooperationspartner: BGR, DBETec GmbH und GRS mbH, GRS – 284, ISBN 978-3-939355-60-1.
- BNATSCHG (2013): Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege (Bundesnaturschutzgesetz - BNatSchG); Ausfertigungsdatum: 29.07.2009 (BGBl. I S. 2542), letzte Änderung durch Artikel 7 des Gesetzes vom 21. Januar 2013 (BGBl. I S. 95).
- BFS (2009): Schachtanlage Asse II - Beschreibung und Bewertung der Stilllegungsoption Vollverfüllung, Stand: 01. Oktober 2009, Verbundprojekt von BfS, AF-Colenco AG, GRS und IfG.
- BFS (2012): <http://www.bfs.de/de/kerntechnik/stilllegung/optionsen.html>, Stand 24.05.2012, Zugriff März 2013.
- BfS (2013): http://www.bfs.de/de/endlager/endlager_morsleben/stilllegung/stilllegungskonzept/abdichtungbauwerke.html, Stand 22.03.2013, Zugriff April 2014.
- BILINSKI, H, MATKOVIĆ, B., MAŽURANIĆ, C. UND BALIĆ ŽUNIĆ, T. (1984): The Formation of Magnesium Oxychloride Phases in the Systems $\text{MgO-MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$ and $\text{NaOH-MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$; *Journal of the American Ceramic Society* 67: 266–269.
- BMU (2010): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle; Stand 30.09.2010, Berlin.
http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/sicherheitsanforderungen_endlagerung_bf.pdf
- BMUB (2014): <http://www.bmub.bund.de/themen/atomenergie-strahlenschutz/nukleare-sicherheit/sicherheit-endlager/sicherheitsanforderungen>
- BOLLINGERFEHR, W., FILBERT, W., LERCH, C. UND THOLEN, M. (2011): Endlagerkonzepte; Abschlussbericht AP 5, DBE Tec, GRS-272, ISBN 978-3-939355-48-9, FuE-Vorhaben UM10A03200.
- BOLLINGERFEHR, W., FILBERT, W., DÖRR, S., HEROLD, P., LERCH, C., BURGWINKEL, P., CHARLIER, F., THOMASKE, B., BRACKE, G. UND KILGER, R. (2012): Endlagerauslegung und -optimierung; Abschlussbericht AP 6, Verbundarbeit: DBE Tec, GRS und nse, GRS-281, ISBN 978-3-939355-57-1, FuE-Vorhaben UM10A03200.
- BORBEMANN, O., KELLER, S., MINGERZAHN, G. UND SCHRAMM, M. (2003): Standortbeschreibung Gorleben Teil 3: Ergebnisse der Erkundung des Salinars – Abschlussbericht; Projekt Gorleben 9G4121100000, 222 S., Hannover.
- BRÄUER, V., EICKEMEYER, R., EISENBURGER, D., GRISSEMAN, C., HESSER, J., HEUSERMANN, S., KAISER, D., NIPP, H.-K., NOWAK, T., PLISCHKE, I., SCHNIER, H., SCHULZE, O., SÖNNKE, J. UND WEBER, J.R.: Description of the Gorleben site Part 4: Geotechnical exploration of the Gorleben salt dome; ISBN 978-3-9814108-0-8, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2011.

- BRENNECKE, P., EILERS, G., KÖSTER, R., KUGEL, K., LASKE, D., MÖLLER, K., PREUSS, J., RANFT, M., REGENAUER, U., SCHUBARTH-ENGELSCHALL, N., SCHULZE, C., STIER-FRIEDLAND, G., THIEL, J., WEISER, A., WOLLRATH, J., ZIEGEL, H-J. UND GERLER, J. (2007): Prüfung von Unterlagen zur Schließung der Schachanlage Asse II im Hinblick auf die Anforderungen eines atomrechtlichen Planfeststellungsverfahrens.
- BUHMANN, D., MÖNIG, J., WOLF, J., KELLER, S., MRUGALLA, S., WEBER, J.R., KRONE, J. UND LOMMERZHEIM, A. (2010A): Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW: FEP-Katalog für einen HAW-Standort im Wirtsgestein Salz; Projekt ISIBEL, Gemeinsamer Bericht von DBETec, BGR und GRS, Peine. Hannover. Braunschweig, –Entwurf–, Dokumentenzeichen: TEC-05-2010-AP.
- BUHMANN, D., MÖNIG, J., WOLF, J., KELLER, S., MRUGALLA, S., WEBER, J.R., EBERTH, S., KREIENMEYER, M., KRONE, J. UND LOMMERZHEIM, A. (2010B): Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von HAW: Entwicklung und Test einer Methodik zur Ableitung eines Referenzszenarios. Gemeinsamer Bericht von DBETec, BGR und GRS. Peine. Hannover. Braunschweig. April 2010.
- BVERFGE (1978): BVerfGE 49, 89 - Kalkar I; Beschluss des Zweiten Senats vom 8. August 1978 - 2 BvL 8/77.
- CAMPHOUSE, R.C. (2012): Analysis Plan for the 2012 WIPP Panel Closure System Performance Assessment; Sandia National Laboratories, AP-161, Carlsbad, New Mexico.
- CHAU, C.K. UND LI, Z. (2008): Microstructures of magnesium Oxychloride; *Materials and Structures* 41: 853-862.
- DAFSTB (2011): DAfStb-Richtlinie – Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (BUMwS); Hrsg. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. Berlin, Oktober 2011.
- DAHLHAUS, F. UND HAUKE, J. (2012): Langzeitverhalten von Beton unter salinaren Bedingungen für langzeitstabile Verschlussbauwerke; *Bergbau* 3/2012, Zeitschrift für Rohstoffgewinnung, Energie und Umwelt.
- DBE (2009): Anforderungen an Salzbeton als Baustoff für Abdichtungsbauwerke im Steinsalz; Verfahrensunterlage Nr. G 296, Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben.
- DELISLE, G. (1980): Berechnungen zur raumzeitlichen Entwicklung des Temperaturfeldes um ein Endlager für mittel- und hochaktive Abfälle in einer Salzformation; *Z. dt. geol. Ges.* 131: 461-482, Hannover (BGR).
- DENG, D. UND ZHANG, C. (1999): The formation mechanism of the hydrate phases in magnesium oxychloride cement; *Cement and Concrete Research* 29: 1365–1371.
- DEPV (2012): Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung - DepV); Ausfertigungsdatum: 27.04.2009 (BGBl. I S. 900), letzte Änderung durch Artikel 5 Absatz 28 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212).
- DIN 1055-100 (2001): Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung – Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln, Norm ist zurückgezogen und ersetzt durch DIN EN 1990:2010-12 und DIN EN 1990/NA:2010-12.

- DIN 18130-1 (1998): Baugrund – Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts - Teil 1: Laborversuche; Hrsg. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Mai 1998.
- DIN 18195-6 (2000): Bauwerksabdichtungen – Teil 6: Abdichtungen gegen von außen drückendes Wasser und aufstauendes Sickerwasser, Bemessung und Ausführung; Hrsg.: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, August 2000.
- DIN 18195-7 (2009): Bauwerksabdichtungen – Teil 7: Abdichtungen gegen von innen drückendes Wasser; Hrsg.: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Juli 2009.
- DIN 18195-9 (2010): Bauwerksabdichtungen – Teil 9: Durchdringungen, Übergänge, An- und Abschlüsse; Hrsg. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin. Mai 2010.
- DIN EN 1990 (2010): Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung; deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010, Hrsg.: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Dezember 2010.
- DIN EN 1992-1-1 (2011): Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken; Teil 1-1 Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010, Hrsg.: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Januar 2011.
- DIN EN 1997-1 (2009): Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln; Deutsche Fassung DIN EN 1997-1:2001 + AC:2009, Hrsg. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, September 2009.
- DIN EN 1997-2 (2009): Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 2: Allgemeine Regeln; Deutsche Fassung DIN EN 1997-2:2001 + AC:2009; Hrsg. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, September 2009.
- DIN 25472 (2012): Kritikalitätssicherheit bei der Endlagerung ausgedienter Kernbrennstoffe; Hrsg. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, August 2012.
- DINNEBIER, R. E., FREYER, D., BETTE, S. UND OESTREICH, M. (2010): $9\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, a High Temperature Phase of the Magnesia Binder System; *Inorganic Chemistry* 49: 9770-9776.
- DOE – DEPARTMENT OF ENERGY (2004): Title 40 CFR Part 191 Subparts B and C Compliance Recertification Application for the Waste Isolation Pilot Plant – Appendix BARRIERS; Carlsbad Field Office, New Mexico.
- DÜSTERLOH, U. (2009): Geotechnischer Sicherheitsnachweis für Hohlraumbauten im Salinargebirge unter besonderer Berücksichtigung laborativer Untersuchungen; Habilitationsschrift, Schriftenreihe: Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik – Institut für Aufbereitung, Technische Universität Clausthal, Heft Nr. 16, 1. Auflage, 2010.
- DÜSTERLOH (2013): Geologische und geotechnische Barrieren – Sicherheitsnachweise und numerische Modellierung; Clausthal-Zellerfeld, Technische Universität, Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik, Vorlesungsskript.
- EBERTH, S. (2008): Modellansätze zum Verheilungsverhalten von Steinsalz und ihre Anwendung auf Querschnittsabdichtungen im Salinargebirge; Dissertation Technische Universität

- Clausthal 2007, Schriftenreihe Professur für Deponietechnik und Geomechanik-Institut für Aufbereitung und Deponietechnik-Technische Universität Clausthal, Heft 15, Papierflieger Verlag GmbH, ISBN 978-3-89720-964-0.
- EHRENBERG, A. (2010): Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff – Aktuelle Situation in Deutschland und Europa; *Beton-Information* 3/4, S. 48-63, Verlag Bau+Technik, Düsseldorf.
- ENSI (2010): Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag geologischer Standortgebiete – Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 1; Hrsg.: Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, ENSI No. 33/070.
- EMPFEHLUNGEN DES ARBEITSKREISES SALZMECHANIK (1993): Empfehlungen des Arbeitskreises "Salzmechanik" der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. zur Geotechnik der Untertagedeponierung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen im Salzgebirge - Ablagerung in Bergwerken; *Bautechnik* 70, Heft 12, Ernst & Sohn Verlag, Berlin.
- EMPFEHLUNGEN DES ARBEITSKREISES SALZMECHANIK (1990): Empfehlungen des Arbeitskreises "Salzmechanik" der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. zur Geotechnik der Untertagedeponierung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen im Salzgebirge - Ablagerung in Kavernen; *Bautechnik* 67, Heft 3, Ernst & Sohn Verlag, Berlin.
- EMPFEHLUNG FELSHOHLRÄUME ZUR ABFALLVERBRINGUNG (1994): Empfehlung Felshohlräume zur Abfallverbringung von Rest- und Abfallstoffen des Arbeitskreises 29 der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau; Sonderdruck *Bautechnik*, Heft 5, S.: 242-264, Ernst & Sohn Verlag, Berlin.
- EURATOM (1996): Richtlinie 96/29/Euratom des Rates vom 13. Mai 1996 zur Festlegung der grundlegenden Sicherheitsnormen für den Schutz der Gesundheit der Arbeitskräfte und der Bevölkerung gegen die Gefahren durch ionisierende Strahlung; Amtsblatt der europäischen Gemeinschaft, Nr. L 159 vom 29. Juni 1996.
- EURATOM (2011): Richtlinie 2011/70/Euratom des Rates vom 19. Juli 2011 über einen Gemeinschaftsrahmen für die verantwortungsvolle und sichere Entsorgung abgebrannter Brennelemente und radioaktiver Abfälle; Amtsblatt der europäischen Gemeinschaft, Nr. L 199 vom 2. August 2011.
- FISCHER, H. (1990): Entwicklung des Versuchsdammbauwerkes von der Konzeption zur berg- und bautechnischen Realisierung; In: Forschungs- und Entwicklungsvorhaben Dammbau im Salzgebirge: Vorträge zur Informationsveranstaltung vom 05. und 06. Dezember 1990, [Untersuchung und Erprobung eines Systems von Baukomponenten zur Entwicklung und Optimierung eines Dammbauwerkes], zsgest. von: W. Bollingerfehr; S. 50-64, Peine, 1991.
- FISCHER, L. (2001): Das neue Sicherheitskonzept im Bauwesen; Ein Leitfaden für Bauingenieure, Architekten und Studenten, ISBN 0932-8351, *Bautechnik Spezial* (Sonderheft), Ernst & Sohn, Berlin.
- FISCHER-APPELT, K., BALTES, B., BUHMANN, D., LARUE, J. UND MÖNIG, J. (2013): Synthesebericht für die VSG; Bericht zum Arbeitspaket 13, FuE-Vorhaben UM10A03200, GRS – 290, ISBN 978-3-939355-66-3.
- FISCHLE, W.R. UND SCHWIEGER, K. (1987): Untersuchungen an einem Abschlußbauwerk im Kalisalzbergwerk Hope; *Kali und Steinsalz* 9, Heft 11, S. 380-387.

- GESETZ ZU DEM ÜBEREINKOMMEN ÜBER NUKLEARE ENTSORGUNG (1997): Gesetz zu dem Gemeinsamen Übereinkommen vom 5. September 1997 über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle (Gesetz zu dem Übereinkommen über nukleare Entsorgung); BGBl Teil II, Nr. 31, S. 1752, 1998, in Bundesrepublik Deutschland am 18. Juni 2001 in Kraft getreten, International: JOINT CONVENTION ON THE SAFETY OF SPENT FUEL MANAGEMENT AND ON THE SAFETY OF RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT, 23 Seiten.
- GG (2012): Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland vom 23. Mai 1949 (BGBl. S. 1); zuletzt geändert durch das Gesetz vom 11. Juli 2012 (BGBl. I S. 1478).
- GECKEIS, H., ALTMAYER, M. UND KADEN, P (2012): Annual Report 2012 – Institute for Nuclear Waste Disposal, KIT SCIENTIFIC REPORTS 7655, Karlsruhe Institute of Technology.
- GDA(1997): GDA-Empfehlungen – Geotechnik der Deponien und Altlasten; Hrsg. Dt. Ges. für Geotechnik e.V. 3. Auflage, Ernst & Sohn Verlag, Berlin.
- GRUNDFELT, B., JONES, C., WIBORGH, M., ANDERSON, J., KREUTSCH, J UND APPEL, D. (2005): Sicherheitstechnische Einzelfragen – Bedeutung des Mehrbarrierenkonzeptes für ein Endlager für radioaktive Abfälle beim Nachweis der Einhaltung der Schutzziele; Kemakta Konsult AB, Kemakta AR 2005-28, Stockholm.
- GRS (2012): <http://wiki.grs.de/index.php/Langzeitsicherheit>; Zugriff im Februar 2012.
- GRS UND PTKA-WTE (2011): Verschlussysteme in Endlagern für wärmeentwickelnde Abfälle in Salzformationen; Workshop der GRS in Zusammenarbeit mit dem Projektträger Karlsruhe PTKA-WTE in Braunschweig, 24.-25. August 2010, GRS – 267, ISBN 978-3-939355-43-4, Braunschweig, Januar 2011.
- HANDBUCH EUROCODE 7 (2011): Handbuch Eurocode 7 – Geotechnische Bemessung Band 1: Allgemeine Regeln; Hrsg.: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Auflage 1, Beuth Verlag Berlin, ISBN 978-3-410-20859-4.
- HARTMUT, K. UND FRANKE, J-H. (1986): Carnallit – thermisches und thermomechanisches Verhalten in Endlager-Salzstöcken. [Carnallite – The Thermal and Thermomechanical Behaviour in a Salt Diapir considered as a Final Disposal Site]. *Z. d. dt. geol. Ges.* Band 137: 1 – 27 veröffentlicht am: 1.1.1986.
- HSK (2007): Sachplan geologische Tiefenlager – Herleitung, Beschreibung und Anwendung der sicherheitstechnischen Kriterien für die Standortevaluation; Hrsg.: Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen HSK, HSK 33/001, November 2007.
- HUNSCHKE, U., SCHULZE, O., WALTER, F. UND PLISCHKE, I., (2003): Projekt Gorleben. Thermomechanisches Verhalten von Salzgestein; Abschlussbericht, 9G2138110000, BGR, Hannover, Dezember 2003.
- Hou, Z. (2002): Geomechanische Planungskonzepte für untertägige Tragwerke mit besonderer Berücksichtigung von Gefügeschädigung, Verheilung und hydromechanischer Kopplung; Habilitationsschrift Technische Universität Clausthal 2002, Schriftenreihe Professur für Deponietechnik und Geomechanik-Institut für Aufbereitung und Deponietechnik-Technische Universität Clausthal, Heft 13, Papierflieger Verlag GmbH, ISBN 3-89720-637-4.

- IAEA (1995): Principles of Radioactive Waste Management – Safety Fundamentals; IAEA Safety Standards for protection people and the environment, Series No. 111-F.
- IAEA (2006): Fundamental Safety Principles – Safety Fundamentals; IAEA Safety Standards for protection people and the environment, Series No. SF-1.
- IAEA (2011): DISPOSAL OF RADIOACTIVE WASTE – Specific Safety Requirements; IAEA Safety Standards for protection people and the environment, Series No. SSR-5.
- IAEA (2012): The Safety Case and Safety Assessment for Disposal of Radioactive Waste – Specific Safety Guide; IAEA Safety Standards for protection people and the environment, Series No. SSG-23.
- ICRP (1985): Protection principles for the disposal of solid radioactive waste; ICRP Publication 46, Ann. ICRP 15 (4).
- ICRP (1997): Radiological protection policy for the disposal of radioactive waste; ICRP Publication 77, Ann. ICRP 27 (Supl.).
- ICRP (1998): Protection recommendation as applied to the disposal of long-lived solid radioactive waste; ICRP Publication 81, Ann. ICRP 28(4).
- ICRP (2007): Recommendation of the International Commission on Radiological Protection; ICRP Publication 103, Ann. ICRP 37(2-4).
- ICRP (2008): Environmental protection: the concept and use of Reference Animals and Plants; ICRP Publication 108, Ann. 38(4-6).
- ICRP (2009): Application of the Commission's recommendations for the protection of people in emergency exposure situations; ICRP Publication 109, Ann. ICRP 39(1).
- ICRP (2010): Application of the Commission's recommendations for the protection of people living in long-term contaminated areas after a nuclear accident or an emergency; ICRP Publication 111, Ann. ICRP 39(3).
- ICRP (2013): Radiological protection in geological disposal of long-lived solid radioactive waste; ICRP Publication 122, Ann. ICRP 42(3).
- IHU (2011): Verfüllen und Verschließen von Strecken – Teil 2; Sachstandsbericht Prüfkompex 7, Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des ERA Morsleben.
http://wieck.mehnert.org/WordPress/2011_12_22_Ver_Strecken.pdf
- JÄNECKE (1923): Die Entstehung der deutschen Kalisalzlager; Verlag Vieweg und Sohn, Braunschweig.
- KIEFER, D. (1997): Sicherheitskonzept für Bauten des Umweltschutzes; In: *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, Heft 481: 3-46. Berlin.
- KIENZLER, B., METZ, V., LÜTZENKIRCHEN, J., KORTHAUS, E. UND FANGHÄNEL, T. (2007): Geochemically Based Safety Assessment; *Journal of nuclear science and technology*, Vol. 44, No. 3, p. 470-476.

- KIENZLER, B. UND VEJMEKLA, P. (1998): Geochemische Modellierung der Korrosion von zementierten Abfallprodukten in Salzlösungen – Experimentelle Basis, Methoden und Ergebnisse, Wissenschaftlicher Bericht FZKA 6046, Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Nukleare Entsorgungstechnik (INE).
- KNOLL, P. (2005): Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckendämme im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallit) für UTD/UTV; Abschlussbericht des BMBF geförderten Forschungsvorhaben 02C0942 (2002-2004), Teutschenthal.
- KORTHAUS, E. (1996): Consolidation and Deviatoric Deformation Behaviour of Dry Crushed Salt at Temperatures up to 150°C; 4th Conference on the Mechanical Behaviour of Salt, Montreal.
- KRÖHN, K.-P., STÜHRENBURG, D., HERKLOTZ, M., HEEMANN, U., LERCH, C. UND XIE, M. (2009): Restporosität und -permeabilität von kompaktierendem Salzgrus-Versatz in einem HAW-Endlager – Phase 1; Abschlussbericht, BGR, DBE TECHNOLOGY GmbH, GRS, Mai 2009.
- KRAUKE, W., LINDENAU, A. UND LACK, D. (2008): Verbundprojekt – Weiterentwicklung von Magnesiabindern von der Strömungsbarriere hin zu einem Verschlusselement im Salinar – Hauptprojekt; Schlussbericht, FZK 02C1214.
- KRAUKE, W. UND FLIß, T. (2008): Konzeptplanung und Nachweisführung für ein Abdichtungsbauwerk im Hauptanhydrit aus Magnesiabinder; Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben. Verfahrensunterlage Nr. P266.
- KRWG (2012): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG); Ausfertigungsdatum: 24.02.2012 (BGBl. I S. 212).
- KA (2011): <http://www.ka-gs.de/>, Zugriff im März 2013
- KA-Sicherheitsgrundlagen, letzte Änderung 2001.
- KA BR (Basisregel) 6: Methodik der Nachweisführung, Sachstandsbericht KA-GS-76, letzte Änderung 1998.
- KA BR (Basisregel) 3: Einschluss der radioaktiven Stoffe, Sachstandsbericht KA-GS-73, letzte Änderung 1998.
- KA BR (Basisregel) 5: Allgemeine technische Anforderungen, Sachstandsbericht KA-GS-75, letzte Änderung 1998.
- KA 1403: Alterungsmanagement in Kernkraftwerken, letzte Änderung 2010.
- KA 2207: Schutz von Kernkraftwerken gegen Hochwasser; letzte Änderung 2004.
- KA 2501: Bauwerksabdichtungen von Kernkraftwerken; letzte Änderung 2010.
- KA 2502: Mechanische Auslegung von Brennelementlagerbecken in Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren, letzte Änderung 2011.
- KA 3201.2: Komponenten des Primärkreislaufes von Leichtwasserreaktoren; Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung, letzte Änderung 1996.
- KA 3211.2: Druck- und aktivitätsführende Komponenten von Systemen außerhalb des Primärkreislaufes; Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung, letzte Änderung 1992.
- KA 3603: Anlagen zur Behandlung von radioaktiv kontaminiertem Wasser in Kernkraftwerken, letzte Änderung 2009.
- Sachstandsbericht KA-GS-78: Empfehlungen zur Berücksichtigung aktueller bautechnischer Normen bei Anwendung der KA-Regeln, 2005.

- LANGER, M. (1985, 1986): Hohlraumbau im Salzgebirge, Überblick über den Stand der Wissenschaft und Technik; Taschenbuch für den Tunnelbau, Teil A 1985, Teil B 1986, herausgegeben von der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V., Verlag Glückauf, Essen.
- LOHMANN, A. (1930): Die Anwendung des chemischen Verfestigungsverfahrens bei der Abdichtung eines Laugendamms und bei Schachtdichtungsarbeiten auf dem Kaliwerk Sachsen-Weimar in Unterbreizbach (Rhön); *Kali und verwandte Salze*, Zeitschrift für die Kali- und Steinsalz-industrie sowie das Salinenwesen, Heft 6, Deutscher Kaliverein, Halle.
- ENGELMANN, H. J., LOMMERZHEIM, A., MÜLLER-HOEPPE, N. UND LINN, M. (1993): Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente DEAB (02E8201), Grubengebäudeplanungen und Temperaturfeldberechnungen für das Arbeitsmodell zum strukturellen Aufbau des Salzstocks Gorleben; DEAB T56, (DBE).
- MAGISTRAT (2008): Statische Vorbemessung; Merkblatt des Magistrats der Stadt Wien, Hrsg.: Magistrat der Stadt Wien, Magistratsabteilung 37, Baupolizei – Gruppe S.; MA 37 - Allg.12192/2008, Wien, 31. März 2008.
- MAUKE, R. (2011): In Situ Investigation of the Morsleben Drift Seal – Operating Experience and Preliminary Results; In: Sandia Proc. 2nd US/German Workshop on Salt Repository Research, Design and Operation, Sandia Report SAND2012-1254c: S. 53-57, November 9-10, Peine, Sandia National Laboratories.
- MAUKE, R. (2013): In Situ Investigation of the Morsleben Drift Seal – Operating Experience and Preliminary Results; In: Sandia Proc. 4th US/German Workshop on Salt Repository Research, Design and Operation, Sandia Report Appendix E: Presentation: S. 88-93, September 17-18, Berlin. <http://www.sandia.gov/SALT/proseeding4.pdf>
- MAUKE, R. UND HERBERT, H.-J. (2013): Large scale in-situ experiments on sealing constructions in underground disposal facilities for radioactive waste – examples of recent BfS- and GRS-activities; Bericht und Vortrag Eurosafe Forum 2013, Seminar 2. <http://www.eurosafe-forum.org/eurosafe-2013-seminar-2>
- MAUKE, R. UND LASKE, D. (2007): Stilllegung Endlager Morsleben – Verfüllen von Strecken mit hohen Anforderungen – Bauzustände für horizontale Strecken (ergänzende Untersuchungen zum Nachweis der Rissbeschränkung im Salzbeton) und Nachweiskonzept für das südliche Wetterloch; Verfahrensunterlage Nr. P255, Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben.
- MAUKE, R. UND MOHLFELD, M. (2010): In situ-Versuch für ein Abdichtungsbauwerk im Steinsalz – Zielstellung, Versuchsprogramm, geotechnische Instrumentierung; Mitteilung des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik TU Braunschweig, *Messen in der Geotechnik* Heft-Nr. 92: 33-43.
- MAUKE, R., STAHLMANN, J. UND MOHLFELD, M. (2012): In situ-Verification of a Drift Seal System in Rock Salt – Operating Experience and Preliminary Results; In: Mechanical behavior of Salt VII: Ed. Bérest, P., Ghoreychi, M., Hadj-Hassen, F. und Tijani, M., Chapter 45: 401-410, ISBN 978-0-415-62122-9.
- MAŽURANIĆ, C., BILINSKI, H., MATKOVIĆ, B. (1982): Reaction Products in the System $\text{MgCl}_2\text{-NaOH-H}_2\text{O}$; *Journal of the American Ceramic Society* **65**: 523–526.

- METZ, V, BAUER, A, VEJMEKA, P., SCHLIEKER, M., SOBALLA, E., RABUNG, S., KERNER, N., KISELY, T., HILPP, S., SEITHER, A., HENTSCHEL, D., LÜTZENKIRCHEN, J. UND KIENZLER, B (2006A): Fachliche Begleitung des Projekts Langzeitsicherheitsnachweis, Nachweis der geochemischen Wirksamkeit von Versatzstoffen aus Mg-Hydroxid / Mg-Oxychlorid in Q-Lösung; Abschlussbericht, FZK-INE 006/04, Institut für Nukleare Entsorgung (INE) und Forschungszentrum Karlsruhe.
- METZ, V., KORTHAUS, E., LÜTZENKIRCHEN, J. UND KIENZLER, B. (2006B): Berechnungen des Radionuklidquellterms auf Grundlage der Verfüllkonzepte G und MAW; Experimentelles Programm zur Bestätigung der Ergebnisse von standortspezifischen Modellrechnungen für die Schachanlage Asse, Bericht FZK-INE 008/05, Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Nukleare Entsorgungstechnik (INE).
- MEYER, T., HERBERT, H.J. UND SCHMIDTDÖHL, F. (2003): Endlager Morsleben – Korrosion von Salzbeton durch salinare Lösungen; Verfahrensunterlage Nr. P180, Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben.
- MEYER, T., TEICHMANN, L. UND HEYDORN, M. (2008): Geotechnische Messungen an einer Pilotströmungsbarriere; In: Messen in der Geotechnik 2008, Fachseminar 23./24. Oktober 2008, *Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik Technische Universität Braunschweig*, Heft 87: 173-191.
- MISRA, A.K. UND MATHUR, R. (2007): Magnesium oxychloride cement concrete; *Bull. Mater. Sci.*, Vol. 30, Nr. 3: 239-246, Indian Academy of Science.
- MÖNIG, J., BUHMANN, D., RÜBEL, A., WOLF, J., BALTES, B. UND FISCHER APPELT, K. (2012): Sicherheits- und Nachweiskonzept; Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, VSG-Abschlussbericht AP 4, FuE-Vorhaben UM10A03200, GRS – 277, ISBN 978-3-939355-53-3.
- MÜLLER-HOEPPE, N. UND KRONE, J. (1999): Ein neuer Ansatz zur Bewertung der Wirksamkeit von Barrieren im Endlager (02E9087); Abschlussbericht und Hauptband; Dt. Gesell. zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE)
- MÜLLER-HOEPPE, N., BUHMANN, D., CZAİKOWSKI, O., ENGELHARDT, H.-J., HERBERT, H.-J., LERCH, C., LINKAMP, M., WIECZOREK, K. UND XIE, M.: (2012A): Integrität geotechnischer Barrieren – Teil 1 Vorbemessung; VSG-Abschlussbericht AP 9.2, FuE-Vorhaben UM10A03100, Verbundarbeit: DBETec GmbH und GRS mbH, GRS – 287, ISBN 978-3-939355-63-2.
- MÜLLER-HOEPPE, N., BREUSTEDT, M., WOLF, J., CZAİKOWSKI, O. UND WIECZOREK, K. (2012B): Integrität geotechnischer Barrieren – Teil 2 Vertiefte Nachweisführung; VSG-Abschlussbericht AP 9.2, FuE-Vorhaben UM10R03200, DBETec GmbH und GRS mbH, GRS – 288, ISBN 978-3-939355-64-9.
- NBAUO (2012): Niedersächsische Bauordnung (NBauO), Fassung vom 10. Februar 2003 (Nds. GVBl. S. 89 - VORIS 21072 02 00 00 000 -) trat am 1. November 2012 durch § 88 Absatz 2 Satz 1 des Gesetzes vom 3. April 2012 außer Kraft, Neufassung 3. April 2012 (Nds. GVBl. S. 46).
- NDS.MBI (2012): Niedersächsisches Ministerialblatt Nr. 37a vom 30.10.2012, Anlagenband 01 zur Liste der Technischen Baubestimmungen – DIN EN 1990, DIN EN 1990/NA, DIN EN 1991-1-1, DIN EN 1991-1-1/NA, DIN EN 1991-1-2, DIN EN 1991-1-2/NA, 62. (67.) Jahrgang, Hannover.

- NIEMEYER, M., RESELE, G., WILHELM, ST., HOLOCHER, J., POPPEL, J. UND SCHWARZ, R. (2009): Endlager Morsleben – Sicherheitsanalyse für das verfüllte und verschlossene Endlager mit dem Programm PROSA; Verfahrensunterlage Nr. P 277, Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben.
- NMU (2002): Planfeststellungsbeschluss für die Errichtung und den Betrieb des Bergwerkes Konrad in Salzgitter als Anlage zur Endlagerung fester und verfestigter radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung vom 22. Mai 2002.
- N.N. (1902): Wasserdichte Verdämmung im Steinsalzgebirge; *Glückauf* 38, Nr. 14: 307-309.
- NOVÁK, B., KUHLMANN, U. UND EULER, M. (2012): Werkstoffübergreifendes Entwerfen und Konstruieren: Einwirkung – Widerstand – Tragwerk; 1. Auflage, Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, ISBN 978-3-433-02917-6.
- NØRLUND CHRISTENSEN, A., NORBY, P. UND HANSON, J.C. (1995): Chemical Reactions in the System $\text{MgO-MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$ Followed by Time-Resolved Synchrotron X-Ray Powder Diffraction; *Journal of Solid State Chemistry* 114: 556-559.
- OECD-NEA (2013): The Nature and Purpose of the Post-closure Safety Cases for Geological Repositories; Radioactive Waste Management; NEA/RWM/R (2013) 1, NEA No. 78121, OECD February 2013.
- OECD-NEA (2012A): Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste; NEA No. 6923, OECD 2012, ISBN 978-92-64-99190-3.
- OECD-NEA (2012B): Indicators in the Safety Case; NEA/RWM/R (2012)7, OECD July 2012.
- PARISER ÜBEREINKOMMEN (1960): Übereinkommen vom 29. Juli 1960 über die Haftung gegenüber Dritten auf dem Gebiet der Kernenergie in der Fassung des Zusatzprotokolls vom 28. Januar 1964, des Protokolls vom 16. November 1982 und des Protokolls vom 12. Februar 2004, Konsolidierter offiziöser Text des Pariser Übereinkommens.
- POLSTER, M. (2010): Ergänzende mechanisch-hydraulisch gekoppelte Berechnungen zur Nachweisführung für Abdichtbauwerke im Steinsalz; DBE, 9M/22310171/ECC/GH/LD/0007/01.
- POPP, T., SALZER, K., SCHULZE, O. UND STÜHRENBURG, D. (2012): Hydromechanische Eigenschaften von Salzgrusversatz - Synoptisches Prozessverständnis und Datenbasis; Technischer Bericht (Memo) im Vorhaben „Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben“, Institut für Gebirgsmechanik (IFG), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Leipzig.
- PRIESTEL, GRUNER UND WASOWIECEZ (2007): Aktuelle Einsatzmöglichkeiten von MgO-Beton; Vortrag zum 6. Baustoffkolloquium am 7. und 8. Februar 2007 in Freiberg.
- QUAST, U. (2002): Ist das Konzept mit Teilsicherheitsbeiwerten überflüssig?; *FRILO-Magazin*, S. 11-21, Friedrich+Lochner GmbH, ISSN 1439-1015 Sprint-Digital-Druck GmbH Stuttgart.
- RESELE, G., RANFT M. UND WOLLRATH, J. (2009): Endlager Morsleben – Nachweis der radiologischen Langzeitsicherheit für das verfüllte und verschlossene Endlager: eine Übersicht; Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben.

- RICHWIEN, W. UND LESNY, K. (2003): Ein probabilistisches Nachweiskonzept für die Gründung von Offshore-Windenergieanlagen; *Erneuerbare Energien* 13, Heft 2: 30-35.
- RÜBEL, A. UND MÖNIG, J. (2010): Prozesse, Modellkonzepte und sicherheitsanalytische Rechnungen für ein Endlager im Salz; GRS-A-3521, Auftragsnummer WS 2044.
- SCHANZ, T., MANJU, M., BAILLE, W. UND LEHMERT, S. (2008): Experimentelle Untersuchungen zur Struktur, dem Abbindeverhalten, der Kompressibilität und den volumetrischen Eigenschaften; Abschließender Einzelbericht der Bauhaus-Universität Weimar im Verbundprojekt Weiterentwicklung von Magnesiabindern von der Strömungsbarriere hin zu einem Verschlusselement im Salinar, FZK 02C1224.
- SCHIRMER T., SCHMIDT K.H. UND MENGEL K. (2013): Mg-oxychloride saltconcrete: Thermodynamic predictions and experimental studies on solid-brine actions. (unveröffentlicht, in Absprache mit den Autoren verwendet)
- SCHON, T. UND HEIDENDAEL, M. (1998): Wasserstoffbildung durch Metallkorrosion; Berichte des Forschungszentrum Jülich, JUEL-3495.
- SCHUPPENER, B (2012): Grundlagen der geotechnischen Bemessung; In: Kommentar zum Handbuch Eurocode 7 – Geotechnische Bemessung: Allgemeine Regeln; Hersg.: Schuppener, B., ISBN 978-3-433-01528-5, Ernst & Sohn GmbH & Co.KG, Berlin.
- SEHER, H. UND BRACKE, G. (2012): Chemische Vorgänge in einem Endlager für hochradioaktive Abfälle in Ton- und Salzgestein; Synthesebericht, GRS – 301, FE-Vorhabens 3609 R 3210, ISBN 978-3-939355-80-9, September 2012.
- SIMMER, K. (1999): Grundbau Teil 2 Baugruben und Gründungen; bearb. von Gerlach, J., Pulsfort, M. und Walz, B., 18. Auflage, 512 Seiten, ISBN 3-519-35232-X, Vieweg+Teubner Verlag.
- SITZ, P. (1982): Querschnittsabdichtungen untertägiger Hohlräume durch Dämme und Pfropfen; Freiburger Forschungshefte A 643, VEB Deutscher Verlag für Grundindustrie, Leipzig.
- SITZ, P. (2003): Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckenverschlussbauwerke für UTD im Salinar, Bau und Test eines Versuchsverschlussbauwerkes unter realen Bedingungen; Bericht zum BMBF geförderten Forschungsvorhaben 02C05472 und 02C0902, Freiberg.
- SKB (2011): Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark - Main report of the SR-Site project; Report-No.: SKB TR-11-01.
- SORRELL, C. A. UND ARMSTRONG, C. R. (1976): Reactions and Equilibria in Magnesium Oxychloride Cements; *Journal of the American Ceramic Society* 59: 51–54.
- STRLSCHV (2012): Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV); Ausfertigungsdatum: 20.07.2001(BGBl. I S. 1714; 2002 I S. 1459), letzte Änderung durch Artikel 5 Absatz 7 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212).
- STÜRENBERG, D. (2007): Long-term laboratory investigation on backfill; In: The Mechanical Behavior of Salt - Understanding of THMC Processes in Salt -, Eds.: Wallner, L., Minkley & Hardy, Jr, S. 223-229, Taylor & Francis Group, London.

- TA-ABFALL (1993): TA-Sonderabfall – Zweite Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz, Gesamtfassung der Zweiten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz; technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalisch, biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen in der ab 1. April 1991 geltenden Fassung / mit einer Einf. von E. Gassner, 2. Aufl., München: Rehm, ISBN 3-8073-1035-5.
- TEICHMANN, L. UND MEYER, T. (2009): Beschreibung der zur Verfüllung der Firstspalten und Resthohlräume in der Südflanke der Schachtanlage Asse ausgewählte Baustoffe Sorelbeton A1 und A1-560; B141594000U, ASSE-GmbH/DBE-Tec.
- THIENEL, K.-CH. (2008): Werkstoffe des Bauwesens – Dauerhaftigkeit von Beton, Script für das Frühjahrstrimester 2008, Institut für Werkstoffe des Bauwesens.
- THOMASKE, B. UND CHARLIER, F. (2013): Forschungs- und Entwicklungsbedarf auf Basis der Erkenntnisse aus der VSG sowie Empfehlungen; Bericht zum Arbeitspaket 14, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS – 304, ISBN 978-3-939355-83-0.
- USDOWSKI, E. UND DIETZEL, M. (1998): Atlas and Data of Solid/Solution Equilibria of Marine Evaporites; Springer Verlag, 318 S.
- UVP-G (2013): Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP-G), Ausfertigungsdatum: 12.02.1990, Neugefasst durch BGBl. I 2010, S. 94, letzte Änderung durch Artikel 2 des Gesetzes vom 21. Januar 2013 (BGBl. I S. 95).
- UVP-V BERGBAU (2010): Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung bergbaulicher Vorhaben (UVP-V Bergbau), Ausfertigungsdatum: 13.07.1990 (BGBl. I S. 1420), letzte Änderung durch Artikel 8 der Verordnung vom 3. September 2010 (BGBl. I S. 1261).
- VAN SAMBEEK, L.L., LUO, D.D., LIN, M.S., OSTROWSKI, W. UND OYENUGA, D. (1993): Seal Design Alternatives Study; SAND92-7340, Albuquerque, N.Mex: Sandia National Laboratories.
- VERSATZV (2012): Verordnung über den Versatz von Abfällen unter Tage (Versatzverordnung - VersatzV), Ausfertigungsdatum: 24.07.2002 (BGBl. I S. 2833), letzte Änderung durch Artikel 5 Absatz 25 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212).
- VOIGT, N., SCHUPPENER, B. UND WEIßENBACH, A. (2006): Nachweisverfahren des EC 7-1 für geotechnische Bemessungen in Deutschland; *Geotechnik* 29, Nr. 3, S. 246-255.
- WAKELEY, L.D., HARRINGTON, P.T AND HANSEN F.D (1995): Variability in Properties of Salado Mass Concrete; SAND94-1495 UC-721, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico.
- WEBER, J.R. UND KELLER, S. (2006): Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW. ISIBEL AP 3, BGR Report, Hannover.
- WEISS, W. (2012): Report of ICRP Task Group 80: radiological protection in geological disposal of long-lived solid radioactive waste; In: ICRP Annals of the ICRP – Proceedings of the First ICRP Symposium on the International System of Radiological Protection 2011, Vol. 41: 294-304, published by Elsevier 2012, ICRP.
- WEISE, D. UND SALZER, K. (2008): Untersuchung der mechanischen Anforderungen und Eigenschaften eines Dichteelementes auf der Basis eines Magnesiumbindersystems; Abschließender Einzelbericht im Verbundprojekt Weiterentwicklung von Magnesiabindern

- von der Strömungsbarriere hin zu einem Verschlusselement im Salinar, FZK 02C1234, Auftragsnummer: IfG 02/2005.
- WEIßENBACH, A. (1998): Umsetzung des Teilsicherheitskonzepts im Erd- und Grundbau; *Bautechnik* 75, Heft 9: 637-651, Ernst & Sohn.
- WHG (2013): Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz - WHG), Ausfertigungsdatum: 31.07.2009, letzte Änderung durch Artikel 6 des Gesetzes vom 21. Januar 2013 (BGBl. I S. 95).
- WIMMENAUER, W. (1985): Petrographie der magmatischen und metamorphen Gesteine; Enke Verlag, ISBN 3-432-94671-6.
- WIPP (2009): Hazardous Waste Facility Permit Renewal Application September – Appendix II: DETAILED DESIGN REPORT FOR AN OPERATION PHASE PANEL CLOSURE SYSTEM Adapted from DOE/WIPP 96-2150.
- WITKE, W. (1973): Anwendung der Finite-Element-Methode auf den Entwurf von untertägigen Dämmen; *Erzmetall*, Vol.26, No.2: 66-74.
- WOLF, J., BEHLAU, J., BEUTH, T., BRACKE, G., BUBE, C., BUHMANN, D., DRESBACH, C., HAMMER, J., KELLER, S., KIENZLER, B., KLINGE, H., KRONE, J., LOMMERZHEIM, A., METZ, V., MÖNIG, J., MRUGALLA, S., POPP, T., RÜBEL, A. UND WEBER, J-R. (2012A): FEP-Katalog für die VSG – Dokumentation; Bericht zum Arbeitspaket 7, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS – 283, Verbundarbeit: BGR, DBE-Tec, GRS, IfG und KIT.
- WOLF, J., BEHLAU, J., BEUTH, T., BRACKE, G., BUBE, C., BUHMANN, D., DRESBACH, C., HAMMER, J., KELLER, S., KIENZLER, H., KRONE, J., LOMMERZHEIM, A., METZ, V., MÖNIG, J., MRUGALLA, S., POPP, T., RÜBEL, A. UND WEBER, J-R. (2012B): FEP-Katalog für die VSG – Konzept und Aufbau; Bericht zum Arbeitspaket 7, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS – 282, Verbundarbeit: BGR, DBE-Tec, GRS, IfG und KIT.
- XIA, S., XING, P. UND GAO, S. (1991): Studies on the basic compounds of magnesia cement: the thermal behavior of magnesium oxychlorides; *Thermochimica Acta* 183: 349-363, Elsevier Science Publisher B.V., Amsterdam.
- XIE, Z. (2003): Rechnerische Untersuchungen zum mechanischen und hydraulischen Verhalten von Abdichtungsbauwerken in Untertagedeponien für den Fall eines Lösungszutrittes; Dissertation Technische Universität Clausthal 2002, Schriftenreihe Professur für Deponietechnik und Geomechanik-Institut für Aufbereitung und Deponietechnik-Technische Universität Clausthal, Heft 12, Papierflieger Verlag GmbH, ISBN 3-89720-651-X.
- ZIEGLER, M. (2008A): Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau; In: Witt, K.J. (Hrsg.): Grundbau-Taschenbuch Teil 1: Geotechnische Grundlagen, 7. Auflage, S. 1-42, Ernst und Sohn, Berlin, ISBN 978-3-433-018439.
- ZIEGLER, M. (2008B): Sicherheitsnachweise in der Geotechnik nach der neuen DIN 1054; *Der Prüflingenieur*, Ausgabe 33 10/2008, S.25-41.

Safety fundamental Principles

Auszug aus IAEA (2006): Fundamental Safety Principles – Safety Fundamentals. Safety Standards No. SF-1

Principle 1: Responsibility for safety

The prime responsibility for safety must rest with the person or organization responsible for facilities and activities that give rise to radiation risks.

Principle 2: Role of government

An effective legal and governmental framework for safety, including an independent regulatory body, must be established and sustained.

Principle 3: Leadership and management for safety

Effective leadership and management for safety must be established and sustained in organizations concerned with, and facilities and activities that give rise to, radiation risks.

Principle 4: Justification of facilities and activities

Facilities and activities that give rise to radiation risks must yield an overall benefit.

Principle 5: Optimization of protection

Protection must be optimized to provide the highest level of safety that can reasonably be achieved.

Principle 6: Limitation of risks to individuals

Measures for controlling radiation risks must ensure that no individual bears an unacceptable risk of harm.

Principle 7: Protection of present and future generations

People and the environment, present and future, must be protected against radiation risks.

Principle 8: Prevention of accidents

All practical efforts must be made to prevent and mitigate nuclear or radiation accidents.

Principle 9: Emergency preparedness and response

Arrangements must be made for emergency preparedness and response for nuclear or radiation incidents.

Principle 10: Protective actions to reduce existing or unregulated radiation risks

Protective actions to reduce existing or unregulated radiation risks must be justified and optimized.

Safety Requirements for disposal of radioactive waste

Auszug aus IAEA 2011: DISPOSAL OF RADIOACTIVE WASTE – Specific Safety Requirements. Safety Standards No. SSR-5

Safety requirements for planning for the disposal of radioactive waste

GOVERNMENTAL, LEGAL AND REGULATORY FRAMEWORK

Requirement 1: Government responsibilities

The government is required to establish and maintain an appropriate governmental, legal and regulatory framework for safety within which responsibilities shall be clearly allocated for disposal facilities for radioactive waste to be sited, designed, constructed, operated and closed. This shall include: confirmation at a national level of the need for disposal facilities of different types; specification of the steps in development and licensing of facilities of different types; and clear allocation of responsibilities, securing of financial and other resources, and provision of independent regulatory functions relating to a planned disposal facility.

Requirement 2: Responsibilities of the regulatory body

The regulatory body shall establish regulatory requirements for the development of different types of disposal facility for radioactive waste and shall set out the procedures for meeting the requirements for the various stages of the licensing process. It shall also set conditions for the development, operation and closure of each individual disposal facility and shall carry out such activities as are necessary to ensure that the conditions are met.

Requirement 3: Responsibilities of the operator

The operator of a disposal facility for radioactive waste shall be responsible for its safety. The operator shall carry out safety assessment and develop and maintain a safety case, and shall carry out all the necessary activities for site selection and evaluation, design, construction, operation, closure and, if necessary, surveillance after closure, in accordance with national strategy, in compliance with the regulatory requirements and within the legal and regulatory infrastructure.

SAFETY APPROACH

Requirement 4: Importance of safety in the process of development and operation of a disposal facility

Throughout the process of development and operation of a disposal facility for radioactive waste, an understanding of the relevance and the implications for safety of the available options for the facility shall be developed by the operator. This is for the purpose of providing an optimized level of safety in the operational stage and after closure.

Requirement 5: Passive means for the safety of the disposal facility

The operator shall evaluate the site and shall design, construct, operate and close the disposal facility in such a way that safety is ensured by passive means to the fullest extent possible and the need for actions to be taken after closure of the facility is minimized.

Requirement 6: Understanding of a disposal facility and confidence in safety

The operator of a disposal facility shall develop an adequate understanding of the features of the facility and its host environment and of the factors that influence its safety after closure over suitably long time periods, so that a sufficient level of confidence in safety can be achieved.

Requirement 7: Multiple safety functions

The host environment shall be selected, the engineered barriers of the disposal facility shall be designed and the facility shall be operated to ensure that safety is provided by means of multiple safety functions. Containment and isolation of the waste shall be provided by means of a number of physical barriers of the disposal system. The performance of these physical barriers shall be achieved by means of diverse physical and chemical processes together with various operational controls. The capability of the individual barriers and controls together with that of the overall disposal system to perform as assumed in the safety case shall be demonstrated. The overall performance of the disposal system shall not be unduly dependent on a single safety function.

Requirement 8: Containment of radioactive waste

The engineered barriers, including the waste form and packaging, shall be designed, and the host environment shall be selected, so as to provide containment of the radionuclides associated with the waste. Containment shall be provided until radioactive decay has significantly reduced the hazard posed by the waste. In addition, in the case of heat generating waste, containment shall be provided while the waste is still producing heat energy in amounts that could adversely affect the performance of the disposal system.

Requirement 9: Isolation of radioactive waste

The disposal facility shall be sited, designed and operated to provide features that are aimed at isolation of the radioactive waste from people and from the accessible biosphere. The features shall aim to provide isolation for several hundreds of years for short lived waste and at least several thousand years for intermediate and high level waste. In so doing, consideration shall be given to both the natural evolution of the disposal system and events causing disturbance of the facility.

Requirement 10: Surveillance and control of passive safety features

An appropriate level of surveillance and control shall be applied to protect and preserve the passive safety features, to the extent that this is necessary, so that they can fulfil the functions that they are assigned in the safety case for safety after closure.

Requirements for the development, operation and closure of a disposal facility

FRAMEWORK FOR DISPOSAL OF RADIOACTIVE WASTE

Requirement 11: Step by step development and evaluation of disposal facilities

Disposal facilities for radioactive waste shall be developed, operated and closed in a series of steps. Each of these steps shall be supported, as necessary, by iterative evaluations of the site, of the options for design, construction, operation and management, and of the performance and safety of the disposal system.

THE SAFETY CASE AND SAFETY ASSESSMENT

Requirement 12: Preparation, approval and use of the safety case and safety assessment for a disposal facility

A safety case and supporting safety assessment shall be prepared and updated by the operator, as necessary, at each step in the development of a disposal facility, in operation and after closure. The safety case and supporting safety assessment shall be submitted to the regulatory body for approval. The safety case and supporting safety assessment shall be sufficiently detailed and comprehensive to provide the necessary technical input for informing the regulatory body and for informing the decisions necessary at each step.

Requirement 13: Scope of the safety case and safety assessment

The safety case for a disposal facility shall describe all safety relevant aspects of the site, the design of the facility and the managerial control measures and regulatory controls. The safety case and supporting safety assessment shall demonstrate the level of protection of people and the environment provided and shall provide assurance to the regulatory body and other interested parties that safety requirements will be met.

Requirement 14: Documentation of the safety case and safety assessment

The safety case and supporting safety assessment for a disposal facility shall be documented to a level of detail and quality sufficient to inform and support the decision to be made at each step and to allow for independent review of the safety case and supporting safety assessment

STEPS IN THE DEVELOPMENT, OPERATION AND CLOSURE OF A DISPOSAL FACILITY

Requirement 15: Site characterization for a disposal facility

The site for a disposal facility shall be characterized at a level of detail sufficient to support a general understanding of both the characteristics of the site and how the site will evolve over time. This shall include its present condition, its probable natural evolution and possible natural events, and also human plans and actions in the vicinity that may affect the safety of the facility over the period of interest. It shall also include a specific understanding of the impact on safety of features, events and processes associated with the site and the facility.

Requirement 16: Design of a disposal facility

The disposal facility and its engineered barriers shall be designed to contain the waste with its associated hazard, to be physically and chemically compatible with the host geological formation and/or surface environment, and to provide safety features after closure that complement those features afforded by the host environment. The facility and its engineered barriers shall be designed to provide safety during the operational period.

Requirement 17: Construction of a disposal facility

The disposal facility shall be constructed in accordance with the design as described in the approved safety case and supporting safety assessment. It shall be constructed in such a way as to preserve the safety functions of the host environment that have been shown by the safety case to be important for safety after closure. Construction activities shall be carried out in such a way as to ensure safety during the operational period.

Requirement 18: Operation of a disposal facility

The disposal facility shall be operated in accordance with the conditions of the licence and the relevant regulatory requirements so as to maintain safety during the operational period and in such a manner as to preserve the safety functions assumed in the safety case that are important to safety after closure.

Requirement 19: Closure of a disposal facility

A disposal facility shall be closed in a way that provides for those safety functions that have been shown by the safety case to be important after closure. Plans for closure, including the transition from active management of the facility, shall be well defined and practicable, so that closure can be carried out safely at an appropriate time.

ASSURANCE OF SAFETY

Requirement 20: Waste acceptance in a disposal facility

Waste packages and unpackaged waste accepted for emplacement in a disposal facility shall conform to criteria that are fully consistent with, and are derived from, the safety case for the disposal facility in operation and after closure.

Requirement 21: Monitoring programmes at a disposal facility

A programme of monitoring shall be carried out prior to, and during, the construction and operation of a disposal facility and after its closure, if this is part of the safety case. This programme shall be designed to collect and update information necessary for the purposes of protection and safety. Information shall be obtained to confirm the conditions necessary for the safety of workers and members of the public and protection of the environment during the period of operation of the facility. Monitoring shall also be carried out to confirm the absence of any conditions that could affect the safety of the facility after closure.

Requirement 22: The period after closure and institutional controls

Plans shall be prepared for the period after closure to address institutional control and the arrangements for maintaining the availability of information on the disposal facility. These plans shall be consistent with passive safety features and shall form part of the safety case on which authorization to close the facility is granted.

Requirement 23: Consideration of the State system of accounting for, and control of, nuclear material

In the design and operation of disposal facilities subject to agreements on accounting for, and control of, nuclear material, consideration shall be given to ensuring that safety is not compromised by the measures required under the system of accounting for, and control of, nuclear material.

Requirement 24: Requirements in respect of nuclear security measures

Measures shall be implemented to ensure an integrated approach to safety measures and nuclear security measures in the disposal of radioactive waste.

Requirement 25: Management systems

Management systems to provide for the assurance of quality shall be applied to all safety related activities, systems and components throughout all the steps of the development and operation of a disposal facility. The level of assurance for each element shall be commensurate with its importance to safety.

EXISTING DISPOSAL FACILITIES

Requirement 26: Existing disposal facilities

The safety of existing disposal facilities shall be assessed periodically until termination of the licence. During this period, the safety shall also be assessed when a safety significant modification is planned or in the event of changes with regard to the conditions of the authorization. In the event that any requirements set down in this Safety Requirements publication are not met, measures shall be put in place to upgrade the safety of the facility, economic and social factors being taken into account.

Teilsicherheitsbeiwerte des Eurocodes

Tab. B - 1: Darstellung von Teilsicherheitsbeiwerten (TSBW) für Einwirkung / Beanspruchung, Widerstand und geotechnische Kenngrößen (basierend auf Anhang A DIN EN 1997-1 2009 (schwarz), NDS.MBI 2012 (blau), HANDBUCH EUROCODE 7 2011 (grün))
Abkürzungen: GZ = Grenzzustand, P = persistent situation (ständige Situation), T = transient situation (vorübergehende Situation), A = accidental situation (außergewöhnliche Situation), E = Situation infolge Erdbeben.

		Bemessungssituation				
		alle	P	T	A	E
Einwirkung γ_F oder Beanspruchungen γ_E						
EQU – für Nachweis von GZ der Lagesicherheit						
Ständige Einwirkungen	γ_G					
Ungünstige (destabilisierend)	$\gamma_{G,dst}$	1,10	1,10	1,05	1,00	
Eigenlast von Tragwerk und nicht tragenden Bauteilen, Einwirkungen die vom Untergrund herrühren		1,10				
Bei kleinen Schwankungen, wenn durch Kontrolle die Unter- bzw. Überschreitung von ständigen Lasten mit hinreichender Zuverlässigkeit ausgeschlossen werden kann			1,05	1,05	1,00	1,00
Für kombinierten Nachweis der Lagesicherheit, der den Widerstand der Bauteile einschließt			1,35	1,35	1,00	1,00
Günstige (stabilisierend)	$\gamma_{G,stab}$	0,90	0,90	0,90	0,95	
Eigenlast von Tragwerk und nicht tragenden Bauteilen, Einwirkungen die vom Untergrund herrühren			0,90	0,90	0,95	0,95
Bei kleinen Schwankungen, wenn durch Kontrolle die Unter- bzw. Überschreitung von ständigen Lasten mit hinreichender Zuverlässigkeit ausgeschlossen werden kann		0,95				
Für kombinierten Nachweis der Lagesicherheit, der den Widerstand der Bauteile einschließt			1,15	1,15	0,95	0,95
Veränderliche Einwirkungen	γ_Q					
Ungünstige (destabilisierend)		1,50	1,50 1,50	1,50 1,25	1,00 1,00	1,00
Außergewöhnliche Einwirkungen	γ_A				1,00	1,00
STR und GEO 2 – für den Nachweis von GZ im Tragwerk (STR) und im Baugrund (GEO 2)						
Ständige Einwirkungen ²¹	γ_G		1,35	1,20	1,10	
Ungünstige (destabilisierend)			1,35	1,35	1,00	1,00
Unabhängige Einwirkung mit ungünstiger Auswirkung	$\gamma_{G,sup}$		1,35	1,35	1,00	1,00
Günstige (stabilisierend)	γ_G	1,00				
Unabhängige Einwirkung mit günstiger Auswirkung	$\gamma_{G,inf}$	1,00	1,00	1,00	1,00	
Beanspruchungen aus ständigen Einwirkungen aus Erdruchdruck	$\gamma_{G,E0}$		1,20	1,10	1,00	
Veränderliche Einwirkungen	γ_Q					
Ungünstige (destabilisierend)			1,50 1,50 1,50	1,50 1,50 1,30	1,30 1,00 1,10	1,30 1,00
Außergewöhnliche Einwirkungen	γ_A				1,00	1,00

²¹ Im Handbuch Eurocode 7 (2011) wird in dieser Gruppe nicht von Einwirkungen gesprochen, sondern von Beanspruchungen aus Einwirkungen. Dabei werden keine ungünstigen ständigen Einwirkungen angegeben, sondern der Aspekt „Beanspruchungen aus ständigen Einwirkungen allgemein – einschließlich ständigem und veränderlichen Wasserdruck“ dargestellt.

		Bemessungssituation				
		alle	P	T	A	E
GEO 3 – für den Nachweis von GZ der Gesamtstandsicherheit						
Ständige Einwirkungen ²²	Y _G		1,00	1,00	1,00	
Ungünstige (destabilisierend) Auswirkung		1,00				
Günstige (stabilisierende) Auswirkung		1,00				
Veränderliche Einwirkungen	Y _Q					
Ungünstige (destabilisierend) Auswirkung			1,30 1,30	1,20 1,30	1,00 1,00	1,00
Außergewöhnliche Einwirkungen	Y _A					1,00
UPR und HYD – für den Nachweis von GZ der hydraulischen Grundbruchsicherheit (HYD) und von Aufschwimm-GZ (UPR)						
Ständige Einwirkungen	Y _G					
Ungünstige (destabilisierend)	Y _{G,dst}		1,05	1,05	1,00	
UPL - ungünstig		1,00				
HYD - ungünstig		1,35				
Günstige (stabilisierende)	Y _{G,stb}		0,95	0,95	0,95	
UPL - günstig		0,90				
HYD - günstig		0,90				
Veränderliche Einwirkungen	Y _Q					
Ungünstige (destabilisierend)	Y _{Q,dst}		1,50	1,30	1,00	
UPL - ungünstig		1,50				
HYD - ungünstig		1,50				
Strömungskraft bei günstigem Untergrund	Y _H		1,35	1,30	1,20	
Strömungskraft bei ungünstigem Untergrund			1,80	1,60	1,35	
Widerstände γ _R						
STR und GEO 2 – für den Nachweis von GZ im Tragwerk (STR) und im Baugrund (GEO 2) (GZ des Versagens von Bauwerken / Bauteilen / Baugrund)						
TSBW für Flächengründungen						
Grundbruch	Y _{R,v}		1,00	1,40	1,00	
Gleiten	Y _{R,h}		1,00	1,10	1,00	
TSBW für Stützbauwerke						
Grundbruch	Y _{R,v}		1,00	1,40	1,00	
Gleiten	Y _{R,h}		1,00	1,10	1,00	
Erdwiderstand	Y _{R,e}		1,00	1,40	1,00	
Allgemein Bodenwiderstand						
Erdwiderstand und Grundbruchwiderstand	Y _{R,e} ; Y _{R,v}		1,40	1,30	1,20	
Gleitwiderstand	Y _{R,h}		1,10	1,10	1,10	
GEO 3 – für den Nachweis von GZ der Gesamtstandsicherheit						
TSBW für Gesamtstandsicherheit						
Erdwiderstand	Y _{R,e}		1,00	1,10	1,00	
Scherfestigkeit	siehe TSBW geotechnische Kenngrößen					
TSBW Geotechnische Größen = TSBW für Bodenkenngrößen γ _M						
EQU – für Nachweis von GZ der Lagesicherheit						
auf den wirksamen Reibungswinkel (tan φ')	Y _{φ'}	1,25				
auf die wirksame Kohäsion	Y _{c'}	1,25				
auf die Scherfestigkeit im undrnierten Zustand	Y _{c_u}	1,40				

²² Im Handbuch Eurocode 7 (2011) werden keine ungünstigen ständigen Einwirkungen angegeben, sondern der Aspekt „Beanspruchungen aus ständigen Einwirkungen einschließlich ständigem und veränderlichen Wasserdruck“ dargestellt.

		Bemessungssituation				
		alle	P	T	A	E
auf die einaxiale Druckfestigkeit	γ_{qu}	1,40				
auf die Wichte	γ_v	1,00				
STR und GEO 2 – für den Nachweis von GZ im Tragwerk (STR) und im Baugrund (GEO 2) – die Werte aus dem HANDBUCH EUROCODE 7 (2011) beziehen sich nur auf GEO 2 (grün)						
auf den wirksamen Reibungswinkel ($\tan \varphi'$)	$\gamma_{\varphi'}$		1,00 1,00	1,00 1,00	1,25 1,00	1,25
auf die wirksame Kohäsion	$\gamma_{c'}$		1,00 1,00	1,00 1,00	1,25 1,00	1,25
auf die Scherfestigkeit im undrännierten Zustand	γ_{cu}		1,00 1,00	1,00 1,00	1,40 1,00	1,40
auf die einaxiale Druckfestigkeit	γ_{qu}		1,00	1,00	1,40	1,40
auf die Wichte	γ_v	1,00				
GEO 3 – für den Nachweis von GZ der Gesamtstandsicherheit						
auf den wirksamen Reibungswinkel ($\tan \varphi'$)	$\gamma_{\varphi'}$		1,25	1,15	1,10	
auf die wirksame Kohäsion	$\gamma_{c'}$		1,25	1,15	1,10	
auf die Scherfestigkeit im undrännierten Zustand	γ_{cu}		1,25	1,15	1,10	
auf die einaxiale Druckfestigkeit	γ_{qu}					
auf die Wichte	γ_v					
UPR– für den Nachweis von Aufschwimm-GZ – die Werte aus dem HANDBUCH EUROCODE 7 (2011) beziehen sich auch auf HYD (grün)						
auf den wirksamen Reibungswinkel ($\tan \varphi'$)	$\gamma_{\varphi'}$	1,25	1,00	1,00	1,00	
auf die wirksame Kohäsion	$\gamma_{c'}$	1,25	1,00	1,00	1,00	
auf die Scherfestigkeit im undrännierten Zustand	γ_{cu}	1,40	1,00	1,00	1,00	
auf die einaxiale Druckfestigkeit	γ_{qu}	1,40				
auf die Wichte	γ_v	1,40				

Teilsicherheitsbeiwerte der KTA

„Teilsicherheitsbeiwerte für die Vorspannung, die ständigen und die veränderlichen Einwirkungen sind entsprechend DIN 1045-1 anzunehmen. Die Teilsicherheits- und Kombinationswerte für allgemeine Nutzlasten, Verkehrslasten, Schnee- und Eislasten, Windlasten sowie Temperatureinwirkungen sind in DIN 1055-100 angegeben“²³ (KTA-GS-78 S.14).

Die Anhaltwerte für Teilsicherheitswerte in der nachfolgenden Tab. B-2 sind der KTA 2502 entnommen, finden sich aber auch als vereinfachte Übersicht in der KTA-GS-78. Im letzteren wird auch vermerkt, dass der Teilsicherheitsbeiwert für quasi-stationäre Nutzlasten bei dem Wert 1,50 liegt und nur in dem Fall den Wert 1,3 annimmt, wenn die Einwirkungsgröße sehr genau erfasst werden kann.

²³ Die erwähnten DIN-Normen im Zitat sind zurückgezogen worden. Die dort verankerten Zahlenwerte und Empfehlungen sind jetzt in den entsprechenden DIN EN – Normen (Eurocodes) zu finden. Während dahingehende Änderungen in einzelnen KTA-Regeln (z.B. KTA 2502) bereits umgesetzt wurden, unterliegt die KTA-GS-78 der Überarbeitung.

Tab. B- 2: Anhaltswerte für Teilsicherheitsbeiwerte (KTA 2502 / KTA-GS-78)

Einwirkungen		TSBW $\gamma_G, \gamma_Q, \gamma_A$
Ständige Einwirkungen G		
	Eigenlasten	1,35 ^a
	Wasserlasten	1,20 ^{a,d}
	Weitere Lasten (z.B. Gestelle, Stützen, Rohrleitungen, Lasten aus angrenzenden und aufliegenden Komponenten)	1,35 ^a
	Zwängungen (aufgezwungene oder behinderte Verformungen oder Bewegungen z.B. Kriechen oder Schwinden von Beton)	1,00
	Temperatureinwirkungen (Wassertemperatur und Temperatur der angrenzenden Räume, dabei zu berücksichtigen ständige – veränderliche – außergewöhnliche Einwirkungen / Temperatur)	1,35 ^{a,b}
Veränderliche Einwirkungen Q		
	Quasi-ständige Nutzlasten (z.B. Lasten aus Lagergut, Lasten Transport- oder Lagerbehälter)	1,35
	Veränderliche Nutzlasten (z.B. Lasten aus Rohrleitungen, Abstellvorgängen, angrenzenden oder aufliegenden Komponenten, Reibkräfte)	1,50 ^c
	Temperatureinwirkungen (Wassertemperatur und Temperatur der angrenzenden Räume, dabei zu berücksichtigen ständige – veränderliche – außergewöhnliche Einwirkungen / Temperatur)	1,50 ^b
Außergewöhnliche Einwirkungen A		
	Temperatureinwirkungen, Einwirkungen von außen, Einwirkungen aus anlageninternen Störfällen (z.B. Temperatur siehe oben, Lasten aus Rohrleitungen und Abstellvorgängen, Einwirkungen von außen –z.B. Erdbeben-, Einwirkungen aus anlageinternen Störfällen –z.B. Strahlkräfte-)	1,00
<p>a 1,00 bei günstiger Auswirkung</p> <p>b Die Zwangsbeanspruchungen infolge der Temperatur können durch nichtlineare Berechnungen erfasst werden. Wenn eine lineare Berechnung durchgeführt wird und im Tragwerk eine Abminderung der Steifigkeit (z.B. durch Rissbildung) möglich ist, darf 1,00 verwendet werden.</p> <p>c 1,35 wenn die Einwirkungsgröße der Qualität einer Eigenlast aufweist.</p> <p>d Da die Einwirkungsgröße sehr genau erfassbar ist, verbleibt nur der Teilsicherheitsbeiwert zur Berücksichtigung von Ungenauigkeiten in der Berechnung und in den Systemannahmen.</p>		

Tab. B- 3: Teilsicherheitsbeiwerte zur Bestimmung des Tragwiderstandes von Bauteilen aus Beton im Grenzzustand der Tragfähigkeit für die Anforderungskategorien A1 bis A3 (KTA 2502 / KTA-GS-78)

		Anforderungskategorie		
		A1	A2	A3
Teilsicherheitsbeiwerte	Beton γ_c	1,50	1,30	1,00
Nichtlineare Verfahren	Systemwiderstand ^a γ_R	1,30	1,10	1,00
	Betondruckfestigkeit ^b γ_{cR}	$0,85 \cdot \alpha \cdot f_{ck}$		$1,00 \cdot \alpha \cdot f_{ck}$
a wird in der KTA-GS-78 auch als Tragfähigkeit bezeichnet				
b Abminderungsbeiwert α nach DIN EN 1992-1-1				

Teilsicherheitsbeiwerte der DAfStb

Tab. B- 4: Sicherheitsbeiwerte aus der DAfStb (2011 Teil 1 Punkt 3 S.8)

	Gegenstand		Normales	Halbes	
			Überwachungsintervall	Überwachungsintervall	
1	Eindringtiefe	γ_e	1,5	γ_e	1,25
2	Betontragverhalten	γ_c	1,25	γ_c	1,05
3	Für Rissbreiten von 0,2 mm	γ_r	1,5	γ_r	1,25
4	Für Rissbreiten < 0,2 mm	γ_r	2	γ_r	1,7

Tab. C- 1: Überblick über die Definitionen und die Anforderungen für die Nachweise der Dichtigkeit, Tragfähigkeit, Beständigkeit, Herstellbarkeit, Dauerhaftigkeit, Zuverlässigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Sicherheit aus einigen Empfehlungen und Richtlinien.

	GDA-Empfehlungen (GDA 1997)	Eurocode (EC) (DIN EN 1990 2010, DIN EN 1997-1 2009)	DIN 18195 (DIN 18195-6 2000, DIN 18195-7 2009, DIN 18195-9 2010)	DAfStb (Richtlinie) (DAfStb 2003, DAfStb 2004)
Dichtigkeit / Dichtigkeit	Die Dichtigkeit beschreibt die Vermeidung eines Schadstoffaustrittes unter einfallspezifischen Randbedingungen. Sie umfasst die Nachweise über die Konvektion, Diffusion, Sorption und die Empfindlichkeit gegenüber Fehlstellen.		Durchdringungen, Übergänge und An- und Abschlüsse müssen, erforderlichenfalls mit Hilfe von Einbauten, so geplant und hergestellt werden, dass sie nicht hinter- oder unterlaufen werden können. Die dazu erforderlichen Konstruktionen und abdichtungstechnischen Maßnahmen sind auf die zu erwartende Wasserbeanspruchung abzustimmen.	Die Dichtigkeit sagt aus, dass die Eindringfront des Mediums als Flüssigkeit während der Beaufschlagungsdauer (Dauer der Einwirkung) mit einem Sicherheitsabstand nachweislich nicht die der Beaufschlagung (Einwirken des Mediums auf Beton) abgewandten Seite des Betonbauteils erreicht.
Tragfähigkeit	= Standfestigkeit Die Tragfähigkeit beschreibt das Verhalten des Abdichtungssystems bei mechanischer Belastung.	Beschreibt die Grenzzustände, die die Sicherheit von Personen und/oder des Tragwerks betreffen. Dabei finden die Grenzzustände bei Verlust der Lagesicherheit und Versagen durch übermäßige Verformung, als auch das Versagen des Tragwerkes durch Materialermüdung oder andere zeitabhängige Auswirkung Beachtung.		
Beständigkeit	Entspricht der Materialsicherheit Sie beschreibt die Beständigkeit gegenüber chemischen, thermischen, hydraulischen und biologischen Lastfällen.			Aussage, dass die Dicht- und Tragfähigkeit durch chemischen Angriff beaufschlagender Medien während der Beaufschlagungsdauer nachweislich nicht verloren geht

	GDA-Empfehlungen (GDA 1997)	Eurocode (EC) (DIN EN 1990 2010, DIN EN 1997-1 2009)	DIN 18195 (DIN 18195-6 2000, DIN 18195-7 2009, DIN 18195-9 2010)	DAfStb (Richtlinie) (DAfStb 2003, DAfStb 2004)
Herstellbarkeit	Beschreibt die Witterungsempfindlichkeit, die Eigenschaften der Materialien im eingebauten Zustand und die Homogenität in Bezug auf die Qualität von Anschlüssen und Durchdringungen			
Dauerhaftigkeit		Ein Tragwerk ist so zu bemessen, dass zeitabhängige Veränderungen der Eigenschaften das Verhalten des Tragwerkes während der geplanten Nutzungsdauer nicht unvorhergesehen verändern. Dabei sind Umweltbedingungen und die geplanten Instandhaltungsmaßnahmen zu berücksichtigen.	Durchdringungen, Übergänge und An- und Abschlüsse dürfen auch bei zu erwartenden Bewegungen der Bauteile oder angrenzender Bodenschichten ihre Funktion nicht verlieren, gegebenenfalls sind dafür besondere Maßnahmen zu treffen. Die Abdichtung ist auch im Bereich von Durchdringungen, Übergängen und An- und Abschlüssen so auszuführen oder abzudecken, dass vorhersehbare Nutzungsbeanspruchungen (Stoß, Abrieb) oder Lage- und Längenänderungen angrenzender Schutzschichten und Beläge nicht zu Beschädigungen oder frühzeitigen Versagen führen	
Zuverlässigkeit		Fähigkeit eines Tragwerks oder Bauteils, die festgelegten Anforderungen innerhalb der geplanten Nutzungszeit zu erfüllen. Die Zuverlässigkeit wird i.d.R. mit probabilistischen Größen ausgedrückt. Zuverlässigkeit gilt für Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit eines Tragwerks.		

	GDA-Empfehlungen (GDA 1997)	Eurocode (EC) (DIN EN 1990 2010, DIN EN 1997-1 2009)	DIN 18195 (DIN 18195-6 2000, DIN 18195-7 2009, DIN 18195-9 2010)	DAfStb (Richtlinie) (DAfStb 2003, DAfStb 2004)
Gebrauchs- tauglichkeit		Die Grenzzustände, die die Funktion des Tragwerks oder eines seiner Teile unter normalen Gebrauchsbedingungen [...] betreffen u.a. Nachweise für folgende Kriterien die Funktionsfähigkeit des Tragwerks nachteilig beeinflussen: <ul style="list-style-type: none"> ○ Verformung und Verschiebungen, <ul style="list-style-type: none"> ▪ die die Funktion des Tragwerks beeinflussen ▪ die die Schäden an Belägen, Beschichtungen oder an nicht-tragenden Bauteilen hervorrufen ○ Schäden, die voraussichtlich <ul style="list-style-type: none"> ▪ die Dauerhaftigkeit beeinflussen 		
Sicherheit	Das Sicherheitskonzept liefert: -langfristig abgesicherte Materialkennwerte der Abdichtungselemente im eingebauten Zustand -Stand sicherheitsnachweise -Nachweis Dichtigkeit. Abdichtungssystem sicher, wenn: -ausreichende Dichtigkeit -während Betriebs- und Nachbetriebsphase eine Beständigkeit gegen zu erwartende mechan., therm., chem., hydraul. und biol. Lasten oder Einflüsse vorliegt (Beständigkeit, Standsicherheit) -eine ausreichende Material sicherheit vorliegt. Ein Tragwerk muss Einwirkungen so aufnehmen, dass es seine Dichtigkeits- und Stand sicherheitseigenschaften (Tragfähigkeitseigenschaften) im Laufe der Zeit nicht verliert.	Fähigkeit des Tragwerks zur Sicherstellung von Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit, die eine Gefährdung der öffentlichen Sicherheit und Ordnung verhindern (DIN 1055-100 2001)		

Tab. D - 1: Gründe zur Auswahl von FEP für die Auslegungsszenarien, Abkürzungen: SchV=Schachtverschluss

	FEP Name	Auswahlgrund
1	Neotektonische Vorgänge	Das derzeitige regionale Spannungsfeld der norddeutschen Tiefebene besitzt eine geringe Dynamik. Dennoch sind großregionale Strukturelemente wie die Sorgenfrei- und die Teisseyre-Tornquist-Zone sowie die Elbe-Linie aktiv (REICHERTER ET AL. 2005). Es wäre zu prüfen inwieweit diese Bewegungen einerseits Einfluss auf die Stärke von Erdbeben haben, andererseits alt angelegte im Untergrund vorhandene Störungszonen (z.B. das Oder- oder Elbe Lineament) in der Zukunft reaktivieren können.
2	Hebung der Erdkruste	Kann eine erhöhte Erosionsrate und eine Verlagerung der Grundwasserleiter in ein tieferes Grundwasserstockwerk induzieren. Durch diese Auswirkungen muss eine Beeinflussung des Schachtverschlusses geprüft werden. Derzeitige Hebungsdaten von 0,01 mm/a basieren auf dem Prinzip des Aktualismus, werden sich aber voraussichtlich mit Einsetzen einer Vergletscherung Skandinaviens erhöhen.
3	Lokale Differenzialbewegungen	Hervorgerufen durch Diapirismus und eistektonische Prozesse können Beeinträchtigungen der geotechnischen Barrieren entstehen. Besonders bei der Überfahung durch einen Gletscher werden durch die einseitig einwirkende Auflast Drücke entstehen, die eine Bewegung des Salzes mit sich führen und damit Spannungsänderungen und eine Lageverschiebung des Schachtverschlusses hervorrufen können.
4	Erdbeben	Durch die seismischen Einflüsse kann eine Beschädigung der geotechnischen Barriere hervorgerufen werden.
5	Erosion	Erosion vermindert die Mächtigkeit des Deckgebirges und führt damit zu Spannungsänderungen (infolge Auflastverringern) und zu einer Verlagerung der Grundwasserleiter in ein tieferes Stockwerk. Prüfung der maximalen Erosionstiefe in Zeiträumen erhöhter Erosion (Vereisung) und Möglichkeit der Beschädigung des SchV.
6	Diapirismus	Induziert eine ständige Bewegung des Salzes bis zum vollständigen Salzeinzug aus den umgebenden Gebieten. Dadurch können Lageverschiebungen der geotechnischen Barriere hervorgerufen werden. Prüfung der noch vorhandenen Salzeinzugsbereiche der Umgebung und dadurch Berechnung der Ausstiegsgeschwindigkeit.
7	Globale klimatische Veränderungen	Entsprechen einer globalen Temperatur- oder Niederschlagsänderung. Es beinhaltet eiszeitliche FEP und Transgression/Regression und deren resultierende Einwirkungen auf eine geotechnische Barriere.

	FEP Name	Auswahlgrund
8	Transgression oder Regression	Resultierend aus globalen klimatischen Veränderungen haben sie Einfluss auf die Erosion, Sedimentation und die Spannungsänderungen und auf deren resultierenden Einwirkungen
9	Permafrost	Hierbei ist besonders der kontinuierliche Permafrost einzubeziehen. Induziert 1. Veränderungen der Grundwasserverhältnisse (bei Abtauen erhöhte Wassermengen), 2. Kontraktionsrisse im Salzgestein und Materialien des SchV. Diese Beanspruchung kann zum Versagen der Schachtabdeckungen kommen. Prüfung, ob oberer SchV davon betroffen ist und damit Rückschluss auf Auslegung bei starken Temperaturdifferenzen.
10	Inlandvereisung in randlicher Lage	Bei Vorstoß eines Gletschers werden durch die einseitig einwirkende Auflast Drücke entstehen, die eine Bewegung des Salzes mit sich führen und damit Spannungsänderungen und eine Lageverschiebung des SchV hervorrufen können. Bei der nächsten Eiszeit wird von einer Inlandvereisung in randlicher Lage ausgegangen.
11	Vollständige Inlandvereisung	Die Auflast des Gletschers und die negative Auflast nach dem Abtauen des Gletscher verursachen große Spannungsänderungen. Zusätzlich wird sich das Grundwasserregime verändern und der Eintrag nicht salinarer Lösungen muss berücksichtigt werden.
12	Inventar Radionuklide	Entweichen Radionuklide aus dem Nahfeld des Einlagerungsbereichs könnten diese zu einem geotechnischen Verschlussbauwerk vordringen. Aus der Art der Radionuklide kann eine mögliche Veränderung des geochemischen Milieus in der Umgebung des Bauwerks abgeleitet werden, die ausschlaggebend die Alteration des Bauwerks bestimmt.
13	Inventar Metalle	Steht in Verbindung mit dem FEP Metallkorrosion.
14	Versatz	Das Versatzmaterial gibt Auskunft über die Zusammensetzung der Lösung bei einem Lösungszutritt im ungesättigten Zustand. Dies ist wichtig, um die chemischen Reaktionen beim Kontakt Lösung / Bauwerk und damit die Veränderung des chemischen Milieus zu beschreiben, was die Eigenschaften des Versatzmaterials beeinflusst.
15	Verschlussmaterial	Komponente der Auslegung
16	Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen	Umfasst die Umwandlung mineralischer und organischer Materialien infolge der Veränderung der chemischen Umgebungsbedingungen. Dies kann zum Verlust der Abdichtungseigenschaften führen und die Funktion der geotechnischen Barriere (Verhinderung des Vordringens und des Abflusses von Lösungen zu/von den Abfällen) beeinträchtigen.

	FEP Name	Auswahlgrund
17	Fehlerhaftes Erstellen eines Strecken- oder Schachtverschlusses	Planungs- und Ausführungsfehler können zu Funktionsbeeinträchtigungen des Barrierebauwerks führen.
18	Konvergenz	Die Konvergenz sorgt für eine Schließung von offenen Hohlräumen. Sie hat damit einen positiven Einfluss auf die Abdichtung des Endlagers. Bei den Verschlussbauwerken wird angenommen, dass sie Hohlräume und besonders die Auflockerungszone und die Kontaktzone zwischen Bauwerk und Umgebungsgestein verschließen wird. Negativ beeinflusst wird dieser Verschluss von Lösungen und Gasen, die in den Hohlräumen vorhanden sind und nicht entweichen können.
19	Fluiddruck	Im Grubengebäude vorhandene Fluide und zutretende Fluide können auf das Verschlussbauwerk mit einem hydrostatischen und hydrodynamischen Druck wirken. Verringern sich die Hohlräume (Poren) steigt der Fluiddruck, wodurch eine Rissbildung induziert werden kann. Dadurch könnte die Funktion des Bauwerks beeinträchtigt werden. Außerdem beeinflusst der Fluiddruck chemische Lösungs- und Fällungsreaktionen und damit die Dichtwirkung der Barriere. Negativ wirkt er auf die Konvergenz. Der Fluiddruck wird von vielen FEP beeinflusst und beeinflusst selbst andere FEP.
20	Versatzkompaktion	Die Versatzkompaktion ist im Rahmen der Auslegung eines geotechnischen Bauwerks wichtig, da der Versatz mit Erreichen einer definierten Permeabilität die Funktion der geotechnischen Barriere übernimmt und somit die erforderliche Lebensdauer des Bauwerks bestimmt.
21	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	Darunter fallen mineralogische Umwandlungen, chemische Prozesse (z.B. Korrosion) bzw. Materialeigenschaften bei Feuchtaufnahme oder -abgabe (z.B. Quellen von Bentonit). Das FEP beschreibt damit alle Volumenveränderungen der Materialien unter Ausschluss von Wärmeeinfluss. Damit spielt es bei der Auslegung der geotechnischen Barriere eine wichtige Rolle.
22	Versagen eines Schacht- oder Streckenverschlusses	Beschreibt das Versagen eines geotechnischen Verschlussbauwerks infolge äußerer Einwirkungen mit dem mindestens teilweisen Verlust der Barriereintegrität innerhalb der Lebensdauer.
23	Lageverschiebung des Schachtverschlusses	Es kann zur Verschiebung des Dichtelementes als auch zu Abrissen an der Kontur führen. Damit wird die Funktionstüchtigkeit der Barriere eingeschränkt bzw. aufgehoben.
24	Permeabilität	Die Permeabilität ist Kenngröße der Durchströmbarkeit eines porösen Mediums. Sie wird in diesem Projekt als primärer Funktionsindikator einer geotechnischen Barriere angesehen.
25	Lösungen im Grubenbau	Dazu gehören salzstockinterne und salzstockexterne Lösungen, die im Grubengebäude auftreten. Sie können die Alteration des Bauwerkes beeinflussen indem sie das chemische Milieu verändern. Außerdem haben sie u.a. Einfluss auf die Konvergenz und den Fluiddruck.

	FEP Name	Auswahlgrund
26	Kanalisation im Versatz	Unter Kanalisation wird die Ausbildung von Fließwegen (Kanälen) verstanden, in denen sich ein strömendes Medium gegenüber seiner Umgebung bevorzugt ausbreiten kann. Kanalisationen im Versatz sind Wegsamkeiten für eindringende Lösung. Treten die Kanalisationen des Versatzes in der Umgebung der geotechnischen Barriere auf, könnten mögliche Lösungen an lokalen Bereichen des Bauwerks auftreten und dort einen Angriffspunkt für punktuelle Alteration bieten. Dies könnte im ungünstigen Fall zu einer Kanalisation im Dichtelement führen.
27	Kanalisation in Dichtelementen	Beschreibt die Ausbildung von Fließwegen (Kanälen) in Dichtelementen, in denen sich ein strömendes Medium gegenüber seiner Umgebung bevorzugt ausbreiten kann. Diese Schwachstellen führen zum Verlust der Barrierewirkung.
28	Lösungszutritt ins Grubengebäude	Ein Lösungszutritt kann die Ausprägung von einwirkenden FEP auf die geotechnische Barriere verändern (z.B. chemisches Milieu, Korrosion, Alteration)
29	Strömungsvorgänge im Grubengebäude	Die in einem Grubenbau vorhandenen Fluide können in Abhängigkeit von den herrschenden Potentialunterschieden die Resthohlräume des Grubengebäudes durchströmen. Das Durchströmen wird durch den Strömungswiderstand beeinflusst. Besondere Aufmerksamkeit gilt hierbei der Auflockerungszone. Die durch Reibung hervorgerufene Strömungskraft kann die Funktionalität der Barriere beeinflussen.
30	Quellen des Bentonits	Ungleichmäßiges Quellen kann zu Umläufigkeiten führen. Zu hoher Quelldruck könnte zu Frakturen im Verschlussmaterial oder Salzgestein (Vergrößerung bzw. Verhinderung des Verschließens der Auflockerungszone infolge Konvergenz) führen.
31	Geochemisches Milieu im Grubenbau	Charakterisiert die wässrige Lösung im Grubenbau. Die Zusammensetzung, der pH-Wert, die Ionenstärke usw., als auch die Beziehung zur Korrosion, bestimmen den Grad der Alteration des Verschlussbauwerks.
32	Auflösung und Ausfällung	Die Materialien des Verschlussbauwerks können unter Einwirkung des geochemischen Milieus in Lösung gehen und damit das Bauwerk zersetzen. Damit kann es zum Verlust der Barrierewirkung kommen. Andererseits können unter bestimmten Bedingungen Stoffe aus der Lösung als feste Phase ausfallen, was u.U. eine zusätzliche Dichtwirkung hervorrufen kann.
33	Metallkorrosion	Zur Metallkorrosion kommt es infolge eines Zutritts von Lösung oder im Zusammenhang mit der Feuchte des Salzgruses oder der Luftfeuchtigkeit. Durch Korrosion von Metallen entstehen Gase, diese beeinflussen das geochemische Milieu, den Fluidruck und die Konvergenz.

	FEP Name	Auswahlgrund
34	Wärmeproduktion	Hier wird besonders die Wärmeentwicklung aus den eingelagerten radioaktiven Abfällen betrachtet. Ob die Wärmeproduktion, die bei der Zersetzung von Organika entsteht, einen nennenswerten Einfluss im Rahmen dieser Betrachtungen hat, müsste untersucht werden. Die Veränderung der Temperatur wirkt auf viele FEP z.B. chemisches Milieu, Auflösung/Ausfällung, Konvergenz, Materialverhalten usw.
35	Thermische Expansion oder Kontraktion	Beschreibt die Volumenänderung von Materialien des Verschlussystems und des Wirtsgesteins infolge von Temperaturveränderungen. Bei solchen Veränderungen entstehen Spannungsänderungen, die zur Rissbildung und damit zur Beeinflussung der Funktionalität der Verschlussbauwerke führen können.
36	Gasbildung	Durch Korrosion von Metallen, Verdampfen von Wasser, Zersetzung organischer Bestandteile, Radiolyse und gegebenenfalls durch Matrixkorrosion wird Gas im Endlager gebildet. Die Gasbildung beeinflusst das geochemische Milieu und damit die Alteration des Verschlussbauwerks sowie den Fluiddruck und die Konvergenz.
37	Gasmenge im Grubenbau	Je nach den hydraulischen Gegebenheiten und der Temperatur ergibt sich aus dem herrschenden Fluiddruck das von der Gasmenge eingenommene Gasvolumen oder das für die Gasmenge verfügbare Gasvolumen bestimmt den Fluiddruck. Das FEP beeinflusst somit hauptsächlich die Konvergenz und das Durchflussverhalten von möglicherweise eindringender Lösung.
38	Gasvolumen im Grubenbau	
39	Gaseindringdruck	Wird der Gaseindringdruck nach einem Zutritt von Lösung in das Endlager nicht erreicht, bleiben Gase in dem Grubenbau eingeschlossen. Bei einem Aufbau von sehr hohen Drücken können sich gegebenenfalls Wegsamkeiten im umgebenen Gestein bilden (Bezug zum FEP "Gasinfiltration ins Salzgestein"). Wird der Gaseindringdruck dagegen überschritten, kann ein Gasstrom über ein Verschlussbauwerk (oder eine andere Wegsamkeit) einsetzen.
40	Auflockerungszone	Die Auflockerungszone kann aufgrund einer erhöhten Sekundärpermeabilität einen potentiellen Fließpfad für das Eindringen von Fluiden in das Endlager und einen Ausbreitungspfad für das Auspressen kontaminierter Fluide bilden.
41	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	Durch Spannungsänderungen und -umlagerungen können Druck, Zug und Scherspannungen entstehen, die zu einer Rissbildung im Verschlussbauwerk oder in dessen unmittelbaren Umgebung führen kann. Damit kann es zur Einschränkung bis zum Verlust der Barrierewirkung kommen.

	FEP Name	Auswahlgrund
42	Thermisch bedingte Spannungsänderungen im Wirtsgestein	Diese Spannungsänderungen entstehen im Salzstock aufgrund der Wärmeentwicklung des eingelagerten radioaktiven Abfalls – einschließlich der Abkühlung aufgrund nachlassender Wärmeproduktion – oder infolge Abkühlung durch klimatischen Einfluss. Sie können zur Rissbildung führen und damit die Funktionsfähigkeit der geotechnischen Barriere oder ihres umliegenden Wirtsgestein führen.
43	Sorption und Desorption	Im Rahmen der primären Sicherheitsfunktion werden diese FEP in der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet.
44	Kolloide	
45	Komplexbildung	
46	Radionuklidtransport in der flüssigen Phase	
47	Advektion	
48	Konvektion	
49	Diffusion	
50	Matrixdiffusion	
51	mechanische Dispersion	
52	Radionuklidtransport in der Gasphase	

Tab. D - 2: Übersicht über die verwendeten FEP für die Vorbemessung unter Berücksichtigung der Lebensdauer des Verschlussbauwerks
Abkürzungen: LD=Lebensdauer, StrV=Streckenverschluss, SchV=Schachtverschluss, Vol.Ä=Volumenänderung.

	FEP Name	Betrachtung		Ausschlusskriterium / Bemerkung
		ohne Begrenzung einer LD	StrV 1000 J.	
1	Neotektonische Vorgänge			keine Relevanz für die Auslegung der Barriere
2	Hebung der Erdkruste			keine Relevanz für die Auslegung der Barriere
3	Lokale Differenzialbewegungen			keine Relevanz für die Auslegung der Barriere
4	Erdbeben	X	X	Gesonderte Betrachtung
5	Erosion	X		vernachlässigbare Erosionsrate innerhalb der ersten 1000 Jahre
6	Diapirismus	X		vernachlässigbare Diapirismusrate innerhalb der ersten 1000 Jahre
7	Globale klimatische Veränderung			keine direkte Einwirkung
8	Transgression oder Regression			keine relevanten Auswirkungen
9	Permafrost	X		nur bei SchV infolge globaler klimatischer Veränderungen
10	Inlandvereisung in randlicher Lage	X		nur bei SchV infolge globaler klimatischer Veränderungen
11	Vollständige Inlandvereisung	X		nur bei SchV infolge globaler klimatischer Veränderungen
12	Inventar Radionuklide			keine Relevanz für die Auslegung der Barriere
13	Inventar: Metalle			zusammengelegt mit FEP Nr. 33
14	Versatz			keine Relevanz für die Auslegung der Barriere
15	Verschlussmaterialien			keine Einwirkung
16	Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen			Auswirkung von chem. Einwirkung
17	Fehlerhaftes Erstellen eines Str- oder SchV			keine Einwirkung

	FEP Name	Betrachtung		Ausschlusskriterium / Bemerkung
		ohne Begrenzung einer LD	StrV 1000 J.	
18	Konvergenz	X	X	
19	Fluiddruck	X	X	
20	Versatzkompaktion			keine Einwirkung, wichtig um die Lebensdauer des Bauwerkes festzulegen
21	Nicht thermisch induzierte Vol.Ä von Materialien	X	X	
22	Versagen eines Sch- oder StrV			Auswirkung
23	Lageverschiebung des Schachtverschlusses			Auswirkung
24	Permeabilität			keine Einwirkung
25	Lösungen im Grubenbau	X	X	keine Einwirkung, dennoch eine wichtige Randbedingung
26	Kanalisation im Versatz			keine Relevanz für die Auslegung der Barriere
27	Kanalisation in Dichtelementen			Auswirkung von chem. Einwirkung
28	Lösungszutritt ins Grubengebäude	X	X	
29	Strömungsvorgänge im Grubengebäude			keine Einwirkung
30	Quellen des Bentonits	X	X	
31	Geochemisches Milieu im Grubenbau	X	X	Im Projekt umbenannt in "Änderung des geochemischen Milieus" = Einwirkung
32	Auflösung und Ausfällung	X	X	
33	Metallkorrosion	X	X	
34	Wärmeproduktion	X	X	keine direkte Einwirkung, aber ausschlaggebend für weitere Betrachtungen
35	Thermische Expansion oder Kontraktion	X	X	
36	Gasbildung			Da Betrachtung von Lösungsmigration im Vordergrund steht, werden die

	FEP Name	Betrachtung		Ausschlusskriterium / Bemerkung
		ohne Begrenzung einer LD	StrV 1000 J.	
37	Gasmenge im Grubenbau			Einflüsse aus der Gasentwicklung und deren Einfluss in dieser Arbeit nicht einbezogen.
38	Gasvolumen im Grubenbau			
39	Gaseindringdruck			
40	Auflockerungszone	X	X	keine Einwirkung, dennoch einbezogen, da Bestandteil der geotechn. Barriere
41	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung			Auswirkung
42	Therm. bedingte Spannungsänderung im Wirtsgestein	X	X	
43	Sorption und Desorption			Im Rahmen der primären Sicherheitsfunktion vorerst keine Relevanz bei der Auslegung der Barriere
44	Kolloide			
45	Komplexbildung			
46	Radionuklidtransport in der flüssigen Phase			
47	Advektion			
48	Konvektion			
49	Diffusion			
50	Matrixdiffusion			
51	mechanische Dispersion			
52	Radionuklidtransport in der Gasphase			

Tab. D - 3: Gründe für die Änderung von Abhängigkeiten von FEP in Bezug auf BUHMANN ET AL. 2010A (erstellte FEP-Matrix Abb. 16 S. 69)

FEP	Hinzugefügt	Entfernt	Geändert	Änderungsgrund
Diapirismus	Beeinflusst durch: ,Inlandvereisung in randlicher Lage' und ',Vollständige Inlandvereisung'	,		Beeinflussung aufgrund weiträumiger Spannungsänderungen durch Vorschub und Auflast von Eismassen
		Beeinflusst: ,Lösungen im Grubenbau'		Eine dahingehende Beeinflussung wird in dieser Arbeit als sehr gering angesehen
Inlandvereisung in randlicher Lage	Beeinflusst: ',Diapirismus'			Beeinflussung aufgrund weiträumiger Spannungsänderungen durch Vorschub und Auflast von Eismassen
Vollständige Inlandvereisung	Beeinflusst: ',Diapirismus'			
Konvergenz	Beeinflusst durch: ,Wärmeproduktion'			Die Duktilität von Salzgesteinen erhöht sich mit Temperaturerhöhung
Fluiddruck	Beeinflusst durch: ,Wärmeproduktion'			Drücke verändern sich mit Temperaturänderung
Versatzkompaktion	Beeinflusst durch: ,Wärmeproduktion'			Versatzkompaktion beschleunigt sich infolge Temperaturerhöhung
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung	Beeinflusst durch: ,Lösungen im Grubenbau' und ',Lösungszutritt ins Grubengebäude'			Lösungen beeinflussen direkt z.B. das ',Quellen des Bentonits' und können zu Auflösungen von Materialien und des Wirtsgesteins führen
Lösungen im Grubenbau	Beeinflusst: ,Quellen des Bentonits' und ',Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien'			Lösungen beeinflussen direkt z.B. das ',Quellen des Bentonits' und können zu Auflösungen von Materialien und des Wirtsgesteins führen
		Beeinflusst durch: ,Diapirismus'		Eine dahingehende Beeinflussung wird in dieser Arbeit als sehr gering angesehen
			Von auslösend zu beeinflusst durch Lösungszutritt ins Grubengebäude	Änderung erfolgte unter der Annahme, dass in jedem Salzstock interne Lösungen bereits vorhanden sind. Die Höhe und Zusammensetzung wird durch einen Lösungszutritt beeinflusst.

FEP	Hinzugefügt	Entfernt	Geändert	Änderungsgrund
Lösungszutritt in Grubengebäude	Beeinflusst ,Quellen von Bentonit', ,geochemisches Milieu', ,Auflösung/Ausfällung, ,Lösungen im Grubengebäude', ,Metallkorrosion', ,Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien'			Neben dem Lösungsvolumen bewirkt die Zusammen- setzung der Lösung bei einem Lösungszutritt: - unterschiedliches Quellverhalten von Bentonit - Zusammensetzung des vorliegenden geochemischen Milieus - kann Auflösungen/Ausfällung bezüglich Sättigungsgrad hervorrufen - Metallkorrosion kann beschleunigt werden
Quellen des Bentonits	Beeinflusst durch: ,Lösungen im Grubenbau' und ,Lösungszutritt ins Grubengebäude'			Mit dem Auftreten von Lösung setzt beim Bentonit ein Quellverhalten ein. Dies ist je nach Zusammensetzung der Lösung unterschiedlich
Geochemisches Milieu	Beeinflusst durch: ,Lösungszutritt ins Grubengebäude'			Ein Lösungszutritt verändert durch die Zusammen- setzung salzstockexterner Lösungen das untertägige geochemische Milieu
Auflösung/Ausfällung	Beeinflusst durch: ,Lösungszutritt ins Grubengebäude'			Durch die Zusammensetzung salzstockexterner Lösungen treten je nach Sättigungsgrad Auflösungen oder Ausfällungen an den Baustoffen und am Wirts- gestein auf.
Metallkorrosion	Beeinflusst durch: ,Lösungszutritt ins Grubengebäude'			Korrosion von Metallen erhöht sich durch den in der Lösung vorliegenden Sauerstoffgehalt
Wärmeproduktion	Beeinflusst: ,Konvergenz', ,Fluiddruck', ,Versatzkompaktion', löst aus: ,Thermisch bedingte Spannungsänderung im Wirtsgestein'			Physikalische Prozesse werden durch Temperatur- veränderungen beeinflusst, so die Viskosität von Salz (Konvergenz, Kompaktion) und vorhandenen Drücken (Fluiddruck) Thermisch bedingte Spannungsänderungen entstehen (neben dem Einbringen von Baustoffen) durch die Wärmeentwicklung infolge der eingelagerten Abfälle
Auflockerungszone	Beeinflusst durch: ,Wärmeproduktion'			Durch eine Temperaturerhöhung kann es infolge erhöhter Konvergenz zu einem „Verheilen“ der ALZ kommen
Thermisch bedingte Spannungsänderung	Ausgelöst durch: ,Wärmeproduktion'			Thermisch bedingte Spannungsänderungen entstehen (neben dem Einbringen von Baustoffen) durch die Wärmeentwicklung infolge der eingelagerten Abfälle